

# Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 350

**bast**

# Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen

von

Wolfram Bartolomaeus  
Fabio Strigari  
Jennifer Sammet

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Bergisch Gladbach

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 350

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt 5315005**  
Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen

**Referat**  
Umweltschutz

**Herausgeber**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-621-4

Bergisch Gladbach, Oktober 2021

## Kurzfassung – Abstract

### Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen

Lärmschutzwandaufsätze bieten eine einfache Möglichkeit zur Verbesserung der akustischen Wirksamkeit bestehender Lärmschutzwände. Hierbei ergibt sich zum einen eine höhere Pegelminderung aufgrund der Erhöhung der Wand, zum anderen lassen sich durch spezielle Geometrien oder absorbierende Materialien zusätzliche Einfügedämpfungen generieren.

Am Beispiel eines Lärmspoilers aus Flüsterschaum wurde die durch den Aufsatz erzeugte Pegelminderung untersucht und einer äquivalenten Erhöhung der Lärmschutzwand gegenübergestellt. Hierfür wurde auf Modellmessungen in der Halle für akustische Modelltechnik, Freifeldmessungen im Nah- und Fernfeld sowie auf numerische Simulationen der Schallausbreitung über die Aufsatzelemente zurückgegriffen. Darüber hinaus ist auch die Hitze-, Frost- und UV-Beständigkeit des Aufsatzmaterials Gegenstand des vorliegenden Projektes.

Die Untersuchung der Materialproben im Impedanz-Messrohr nach Materialbelastung ergibt, dass die akustischen Eigenschaften größtenteils erhalten bleiben. Es ist keine signifikante Abschwächung des Absorptionsgrades zu beobachten. Hinsichtlich der akustischen Wirksamkeit zeigt sich, dass die betrachteten Lärmschutzwandaufsätze im Vergleich zu einer Erhöhung der Wand keinen signifikanten akustischen Mehrwert besitzen. Alle Messungen liefern bei normgerechten Vorgehen eine akustische Wirksamkeit von unter 1 dB. Verglichen mit der (niedrigeren) Wand ohne Aufsatz führt die Installation der Lärmspoiler zu Pegelminderungen von ca. 3 dB – 4 dB. Die numerischen Simulationen bestätigen die Messergebnisse im Wesentlichen. In weiterführenden Vergleichen lassen sich zudem die verschiedenen Einflüsse auf die Schallausbreitung separieren: Während das Absorptionsmaterial selbst einen positiven Effekt auf die akustische Wirksamkeit hat, scheint die Geometrie des Aufsatzes den erreichbaren Einfügedämpfungen abträglich zu sein.

Die Untersuchung zeigt, dass die Modifizierung der Beugungskante prinzipiell Potential für einen zusätzlichen Minderungseffekt birgt. Die methodenübergreifende Analyse erlaubt eine gute Einschätzung

der akustischen Wirksamkeit und soll zukünftig bei der Optimierung und praktischen Umsetzung derartiger Aufsätze helfen.

### Effectiveness of noise barrier add-on elements

Add-on elements for noise barriers offer an easy possibility to improve the acoustic efficiency of existing barriers. Using such elements leads to an additional sound level reduction due to the increased height of the barrier, on the other hand special geometries or absorbing materials allow generating enhanced insertion losses.

In the framework of this study the level reduction induced by a so-called “noise spoiler” made of synthetic foam was determined and compared to the effect obtained by simply increasing the barrier height accordingly. For this purpose, model measurements in the acoustic laboratory, field measurements in the near and far field and numeric simulations of the sound propagation across the modified edge were carried out. Moreover, the durability of the absorber material against heat, cold and UV radiation is assessed.

The material test with the impedance measuring tube after exposure to heat, cold and UV radiation reveals that the acoustic properties are largely preserved. No significant decrease of the degree of absorption can be detected. Regarding the acoustic efficiency the measurements illustrate that the considered add-on elements have no significant acoustic benefit compared to an equivalent elevation of the noise barrier. Values below 1 dB for the acoustic efficiency are obtained when the measurements are carried out according to the standards. When comparing the results to the case of a (lower) barrier without add-on, the installation of the “noise spoiler” yields a sound level reduction of about 3 dB – 4 dB. The numeric simulations essentially confirm the measurement results. Further analyses additionally allow separating the different influences on the sound propagation: While the absorber material itself has a positive impact on the acoustic efficiency, the geometry of the add-on elements seems to be detrimental for the achievable insertion losses.

The investigation shows that, in principle, the modification of the diffraction edge has the potential for additional noise reduction. The multi-methodological evaluation allows a fair evaluation of the acoustic efficiency and will serve as valuable input for future optimization and realization processes.

## Summary

### Effectiveness of noise barrier add-on elements

## 1 Introduction

Add-on elements for noise barriers offer an easy possibility to improve the acoustic effectiveness of existing noise barriers. On the one hand they provide a higher sound level reduction due to the enhancement of the barrier, on the other hand special geometries or absorbing materials can generate further insertion losses.

The goal of the project is to revise the acoustic effectiveness and possible applications of add-on elements for noise barriers along federal highways. The object of investigation is an absorbing add-on system – a so-called “noise spoiler” – made from large-pored synthetic foam with a height of 50 cm, which according to the manufacturer specifications has an acoustic benefit equal to a barrier enhancement of 1.3 m.

Besides the determination of the material’s durability against heat, frost and UV radiation, the present project deals with the objective determination of the acoustic effectiveness of the add-on elements. Basically the study has the following four steps:

1. Investigation of the degree of absorption and the durability of the add-on material
2. Measurements of the acoustic effectiveness in the near and far field
3. Measurements at a model setup in the acoustic laboratory (HaMt)
4. Numeric simulations of the sound propagation across the add-on elements in comparison to a conventional increase of the barrier’s height (a) with the boundary element method SYSNOISE and (b) with the finite element method ANSYS

## 2 Existing measurements

The company NUA-Umweltanalytik GmbH has carried out in-situ measurements on the add-on

system under investigation in Austria in the year 2008. In the reference measurements without add-on the same microphone heights were used as in the measurements with add-on. In total, mean reductions of 1.4 dB to 2.2 dB were detected.

On behalf of DB Netz AG the company Möhler+Partner Ingenieure AG performed measurements of the acoustic effectiveness on the add-on elements mounted on top of a 2.5 m high aluminium barrier. For comparison the barrier height was increased to 3 m. The results show neither a better nor a similar effectiveness of the noise spoiler compared to the higher barrier. For lower immission heights (1.2 m and 3.6 m) the higher barrier works about 1 dB to 2 dB better than the noise spoiler.

Measurements with the so-called „Adrienne method“ according to (DIN EN 1793-4, 2015) have been carried out by the Austrian Institute of Technology GmbH (AIT) in 2015 (Conter et al., 2015). The reference height in agreement with the standard and a reduced reference height (reduced by the height of the add-on element) not in agreement with the standard were used. The measurements yield an additional sound level reduction due to the add-on element between 5 dB and 7 dB at a distance of 2 m and 3 m, respectively.

## 3 Material characterization

The add-on elements used in the present study are shown in figure 1. The material is a large-pored foam from polyethylene (structure size about 10 mm). The system consists of two different elements of different geometry. In the final noise barrier add-on a broad element and two narrow elements alternate.

For the investigation of the temperature stability a climatic chamber was used. It allows experiments between  $-40^{\circ}\text{C}$  and  $+180^{\circ}\text{C}$ . Two broad and two narrow elements were soaked with water to simulate heavy rain at the beginning of the test phase. After that the samples were put inside of the climatic chamber. The samples were exposed to 10 test cycles, which correspond to 30 freeze/thaw-changes, and showed no visible changes in the material afterwards. The heat period after the freeze/thaw-changes also had no visible effect. Additionally, the elements were exposed to 2,000 h of UV radiation.



Fig. 1: Noise barrier add-on system under investigation

An impedance tube was used for determining the degree of absorption  $\alpha$  of the sample material. The absorption changed only slightly after exposing the material to heat, freeze and UV radiation. Contrary to the expectations a small enhancement of the degree of absorption can be detected for frequencies above 1,100 Hz. More significant changes of e.g. 10.4% and 5.1% appear in the frequency bands at 1,250 Hz and 1,600 Hz, respectively. After all experiments the material had no significant visible changes. Only at the surface of the samples the holes of the perforation slightly increased in size and became frayed.

Apart from the absorption, the admittance of the samples was determined. The admittance (as reciprocal value of the impedance) is used in the software SYSNOISE and ANSYS as input for the material properties.

## 4 Measurements of the acoustic attenuation

### 4.1 Measurements in the near and far field

In the framework of this project the company Acoustic Engineering Dresden has been engaged to investigate the add-on elements in the near field according to (DIN EN 1793-4, 2015) and in the far field by using a microphone array. The measurement took place at a free standing barrier. The measurements in the near field were carried out as described in the standard and the spectral diffraction index difference of the noise spoiler was calculated. In the far field setup the spectral sound level without and with add-on element was measured, so that the spectral insertion loss of the add-on element could be calculated – both with and without considering the enhancement of the effective height of the barrier.

The results show a total insertion loss in the near field of about 0.7 dB and in the far field 2.7 dB (not including the correction of the increased barrier height due to the add-on) and 1.0 dB (including the correction of the increased barrier height). Thus, similar results are obtained for the near and far field. Differences due to propagation effects are apparent.

### 4.2 Model measurements in the acoustic laboratory

The add-on elements were mounted on top of a 1 m high wooden barrier in the acoustic laboratory (HaMt). White noise was used as emission source. With the help of two step motors that are attached to an aluminium frame and move in two orthogonal directions, the microphone was positioned to measure the spectral insertion loss. A reference microphone allowed monitoring the emission level behind the wall during the measurement.

The analysis is carried out based on the ISO 9613-2 standard. In total, the measurements at the non-standard positions (as used in the AIT study) yield values of 4.4 dB (2 m distance) and 3.4 dB (3 m distance) for the insertion loss. The characteristic increase of the insertion loss with increasing frequency due to the diffraction effect can be recognised. On the contrary, when using the standard-conform positions, a non-significant (negative) insertion loss of 0.4 dB is detected.

## 5 Simulation of the sound propagation

In a first step the software LMS SYSNOISE Rev. 5.6 was used for carrying out numeric simulations with the indirect BEM (boundary element method). Three model variants were considered: The noise barrier with an ideally reflective surface without and with add-on element, where in the latter the emission is positioned once with respect to the top edge of the barrier (non-standard) and once with respect to the top edge of the add-on element (standard).

As an example, in figure 2 the frequency-averaged sound pressure level (1,000 Hz third-octave band) behind the noise barrier for the calculation with add-on element and non-standard position of the emission source is shown. The black and white dots represent the analysed microphone positions. Subtracting the results for different model variants from each other leads to simulated insertion losses that can be compared to the measurement results.

Using SYSNOISE for the BEM simulations had several technical drawbacks, so that not all variants and frequencies could be calculated. Only the third-octave bands at 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz and 1,000 Hz could be considered. For the standard-conforming comparison of the barrier with and without add-on element, insertion losses below 1 dB are obtained. In three cases the calculation yields even negative values for the attenuation.

Although no clear systematics is visible in the results, one can deduce that the SYSNOISE

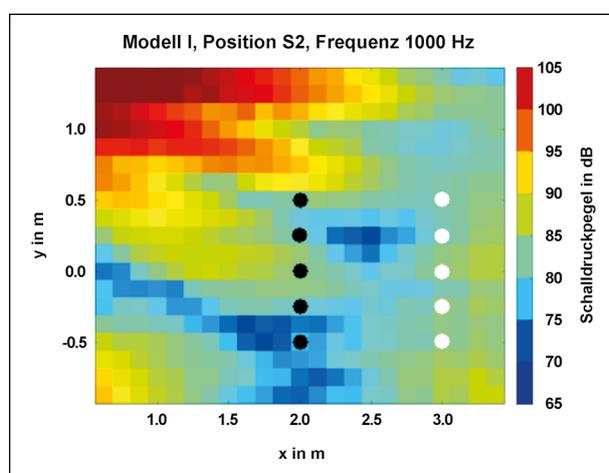


Fig. 2: Averaged sound pressure level behind the noise barrier for the calculation with add-on element and non-standard position of the emission source, centre frequency of third-octave band = 1,000 Hz.

simulations cannot prove a significant acoustic effectiveness of the add-on. As expected, the non-standard comparison (as analogously performed in the AIT study) gives higher insertion losses between 2.8 dB and 14.3 dB. The values lie in a similar order of magnitude as in the AIT study, but here as well no systematics with varying frequency can be seen. Nevertheless, the results demonstrate that mounting the noise spoiler generally improves the acoustic situation – but without giving quantitative values for the acoustical effectiveness or clarifying to what extent the effect is induced by the enhanced barrier height alone or the material properties.

Further simulations were carried out with the finite element method (FEM) and the software ANSYS 19.0. Similar to the calculations in SYSNOISE, different model variants were considered and compared: noise barrier without add-on element, noise barrier with non-absorbent add-on element, noise barrier with add-on element and assigned material impedance – both in the standard-conforming measurement geometry and the deviant measurement geometry as in the AIT study.

The calculated sound pressure level for the simulation volume is shown in figure 3 as contour plot, exemplary for the variant with add-on element. The frequency is 1,360 Hz and the emission source is positioned 50 cm below the top edge of the add-on element. The figure shows a cut through the centre of the volume along the x-z plane.

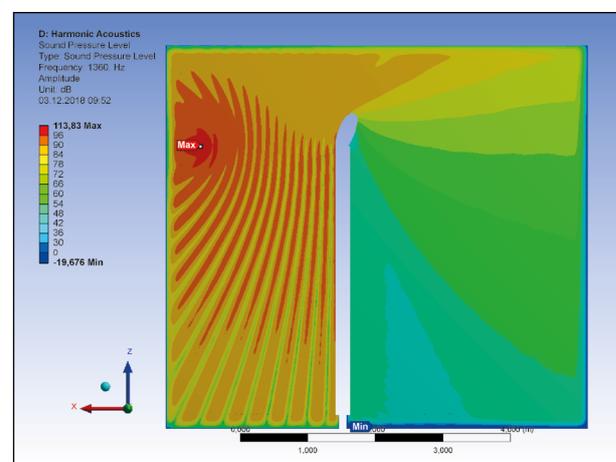


Fig. 3: FEM calculation of the sound pressure level at 1,360 Hz for the noise barrier with add-on element, including the material impedance; the emission source is situated 50 cm below the top edge of the add-on element at a distance of 2 m.

The values for the insertion losses that result from the comparisons of the different variants yield four essential conclusions about the add-on element:

1. The standard-conforming comparison of the barrier with and without add-on element makes clear that the acoustic effectiveness non-significant for nearly all third-octave bands (insertion losses below 1 dB). This confirms the presumptions from the SYSNOISE calculations.
2. The non-standard comparison, i.e. without adjusting the heights of the source and the microphones, gives the contribution to the acoustic effectiveness of the add-on element which results from the enhancement in height. On average one can assume a reduction between 6 dB and 7 dB. The insertion losses calculated with ANSYS show a good consistency and clear frequency dependence.
3. The FEM simulation under the assumption of a non-absorbent add-on element proves a significant effect induced by the material impedance. In particular, the results show that the contribution of the add-on material lies between 1 dB and 2 dB.
4. A surprising result, and at the same time an explanation for the loss of the positive effect of the material, is obtained when comparing the simulation of the barrier without add-on element with the non-absorbent add-on. An increase of the sound level between 1 dB and 2 dB is observed, presumably originating from the form or the dimensions of the elements.

## 6 Conclusion and outlook

The results of the ANSYS FEM simulations are summarized in figure 4 together with the results from the model measurements in the acoustic laboratory and the results published in the study by AIT. The figure shows that the measurements cannot be reproduced one-to-one by the numeric simulations, however, the calculations by ANSYS can explain both the low acoustic effectiveness when measuring according to the standard and the high values for the insertion loss when measuring as done in the study by AIT. In the latter case the ANSYS calculations slightly overestimate the acoustic effectiveness. On the other hand, the

model measurements in the acoustic laboratory yield relatively low values for the insertion loss, especially in the mid-frequency range. The reason for this discrepancy can essentially be seen in the different measurement procedures (permanent white noise vs. pulsed test signal). Therefore, a direct quantitative comparison of the resulting insertion losses, respectively, diffraction index differences is limited.

In summary, in different measurements and simulations, comprehensive and significant insights about the acoustic effectiveness of the noise spoiler type under investigation could be gained. It could be shown that the absorbing add-on system has no significant additional effect compared to a simple enhancement of the barrier height. However, when increasing the protection level of an existing barrier, also other criteria (e.g. costs, local situation, maintenance, visual aspects etc.) might influence the decision. An easy installation might be an argument in favor of the add-on elements.

The present study has shown that the modification of the diffraction edge of noise barriers involves additional potential for noise reduction. The multi-methodological evaluation makes it possible to quantify the noise reduction potential and obtain information about the predictability of the acoustic effectiveness of edge-modified noise barriers with the help of FEM simulations. The knowledge about the quality and transferability of numeric simulations will serve as valuable input for future optimization and realization processes.

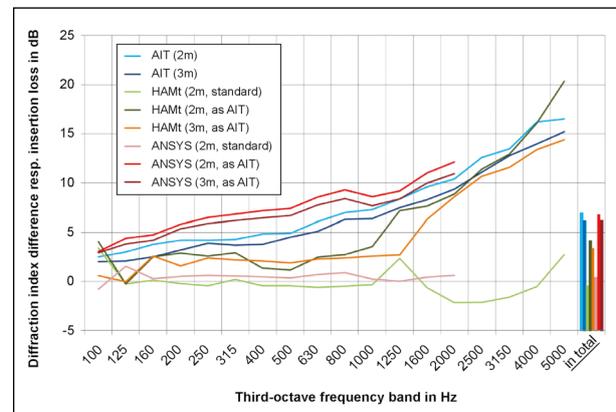


Fig. 4: Comparison of the measurement results for the diffraction index difference/insertion loss of the add-on element with the results of the FEM simulations in ANSYS

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	11	<b>Literatur</b> .....	41
1.1	Wichtige Hinweise zu den verwendeten Begriffen .....	11	<b>Bilder</b> .....	42
<b>2</b>	<b>Existierende Messberichte</b> .....	12	<b>Tabellen</b> .....	43
2.1	NUA-Umweltanalytik GmbH 2008 .....	12	<b>Anhang</b>	
2.2	Möhler+Partner Ingenieure AG 2011 ..	12	Anhang 1 – HaMt-Ergebnisse	
2.3	AIT 2015 .....	13	Anhang 2 – Berechnungsergebnisse SYSNOISE	
<b>3</b>	<b>Charakterisierung des Aufsatzmaterials</b> .....	14	Anhang 3 – Berechnungsergebnisse ANSYS	
3.1	Materialbeschreibung .....	14	Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <a href="https://bast.opus.hbz-nrw.de">https://bast.opus.hbz-nrw.de</a> abrufbar.	
3.2	Materialtests .....	14		
3.3	Absorptionseigenschaften .....	16		
<b>4</b>	<b>Messungen der akustischen Dämpfung</b> .....	19		
4.1	Messungen im Nah- und Fernbereich .....	19		
4.2	Modellmessungen in der HaMt. ....	23		
4.3	In-situ-Messungen .....	26		
<b>5</b>	<b>Simulation der Schallausbreitung</b> ...	27		
5.1	SYSNOISE .....	27		
5.2	ANSYS .....	31		
<b>6</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b> .....	36		
6.1	Zusammenfassung der Messungen ...	36		
6.2	Zusammenfassung der Simulationen. .	37		
6.3	Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse .....	38		
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b> .....	39		



## 1 Einleitung

Ziel des Projektes war die Überprüfung der akustischen Wirksamkeit und der Einsatzmöglichkeit von Lärmschutzwandaufsätzen auf Lärmschutzwänden an Bundesfernstraßen zur Pegelminderung. Betrachtet wurde ein absorbierendes Aufsatzsystem aus grobporigem Schaumstoff mit einer Höhe von 50 cm, das laut Datenblatt des Herstellers die akustische Mehrleistung einer Lärmschutzwanderhöhung von 1,3 m liefert. Dagegen zeigte das Produkt in einer Untersuchung an Schienenwegen des Bundes (siehe hierzu Kapitel 2.2) keine akustische Wirksamkeit. Jedoch liegt die Quellhöhe von Straßenemissionen wesentlich niedriger, sodass eine gewisse akustische Wirksamkeit möglich erscheint. Neben einer Ermittlung von Hitze-, Frost- und UV-Beständigkeit des Aufsatzmaterials stand die objektive Ermittlung der akustischen Wirksamkeit der Aufsätze im Mittelpunkt des vorliegenden Projektes.

Das Projekt sah vier Arbeitsschritte vor:

1. Untersuchung der akustischen Eigenschaften (Absorptionsgrad) und der Haltbarkeit (Hitze-, Frost- und UV-Beständigkeit) des Aufsatzmaterials
2. Vergleichsmessungen an einem Modell des Aufsatzes in der Halle für akustische Modelltechnik (HaMt)
3. Messungen der akustischen Wirksamkeit des Aufsatzes im Nah- und Fernfeld mit der ADRIENNE-Methode und einem Linien-Mikrofonarray der Fa. AED
4. Rechnerische Simulation der Schallausbreitung über die Aufsatzelemente im Vergleich zu einer herkömmlichen Wanderhöhung (a) mit der Randelementmethode SYSNOISE und (b) der Finite-Elemente-Methode ANSYS

Der Aufsatz wurde außerdem im Forschungsprojekt FE 02.417/2017/IRB „Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen“ in situ auf einer Autobahnbrücke der BAB 7 in Uttrichshausen bei Fulda erprobt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Kapitel 4.3 zusammengefasst.

### 1.1 Wichtige Hinweise zu den verwendeten Begriffen

Innerhalb dieses Berichtes werden die Begriffe „Schallbeugungsindex-Differenz“, „Einfügedämpfung“ und „akustische Wirksamkeit“ wiederholt verwendet. Vorab soll daher eine kurze Definition dieser Begriffe erfolgen und die Verwendung in diesem Bericht erklärt werden.

#### Schallbeugungsindex, Schallbeugungsindex-Differenz

Der Schallbeugungsindex  $DI_j$  beschreibt den Effekt der Beugung an einer Lärmschutzvorrichtung und ist das Ergebnis des Prüfverfahrens, das in der (DIN EN 1793-4, 2015) beschrieben ist. Im Wesentlichen gehen in den Schallbeugungsindex die Impulsantwort einer Freifeldmessung und die Impulsantwort einer Messung mit dem zu prüfenden Aufbau ein. Für Details siehe Gleichung (1) in Kapitel 4.6 der (DIN EN 1793-4, 2015). Hat man  $DI_j$  für eine Lärmschutzwand mit und ohne Wandaufsatz bestimmt, lässt sich daraus die Schallbeugungsindex-Differenz  $\Delta DI_j$  bilden, die die Änderung der Schallbeugung durch den Wandaufsatz beschreibt und charakteristisch für den Prüfkörper ist.

#### Einfügedämpfung

Die Einfügedämpfung  $D_E$  (auch Einfügedämpfung) beschreibt die Minderung eines Signals durch eine Abschirmung, die in den Ausbreitungsweg eingefügt wird. Zur Einfügedämpfung tragen prinzipiell alle Einflüsse bei, die die Ausbreitung des Schalls von der Quelle zum Immissionsort modifizieren. In der (VDI 2720, 1997) wird die Einfügedämpfung aus dem Abschirmmaß des Schallschirms und Zusatzdämpfungen aufgrund Bewuchs, Bebauung und Boden- und Meteorologie-Einflüssen berechnet. Messtechnisch vergleicht man üblicherweise die Schallimmission an einem definierten Ort mit und ohne Prüfkörper im Ausbreitungsweg (Vorder-Nachher-Vergleich). Die Emission kann künstlich erzeugt sein (z. B. weißes Rauschen) oder man verwendet eine reale Verkehrssituation. Die Differenz der Immissionspegel mit und ohne die zu prüfende Lärmschutzvorrichtung stellt dann die Einfügedämpfung dar.

## Akustische Wirksamkeit

Der Begriff „Akustische Wirksamkeit“ wird allgemein für das Lärminderungspotenzial einer Lärmschutzmaßnahme verwendet. Je höher der Minderungseffekt beispielsweise einer Lärmschutzwand oder eines Fahrbahnbelags ist, desto höher ist die akustische Wirksamkeit. Sowohl die Schallbeugungsindex-Differenz als auch die Einfügedämpfung können als Maß für die akustische Wirksamkeit herangezogen werden. In diesem Bericht werden beide Differenz-Größen als gute äquivalente Abschätzungen für die akustische Wirksamkeit der Wandaufsätze betrachtet. In erster Näherung ist dies zulässig, da stets relative Änderungen betrachtet und nie Absolutwerte des Schallbeugungsindex bzw. Immissionspegels verglichen werden. Es ist jedoch zu betonen, dass dies nur näherungsweise korrekt ist, da sich die Bestimmung beider Größen (wie oben beschrieben) und damit auch deren Ausprägung unterscheiden. Bei der Interpretation der Messergebnisse ist dies zu beachten.

## 2 Existierende Messberichte

### 2.1 NUA-Umweltanalytik GmbH 2008

Die Fa. NUA-Umweltanalytik GmbH hat im Auftrag der ASFINAG Baumanagement GmbH im Jahre 2008 Feldmessungen am hier betrachteten Aufsatzsystem an der A2 in Österreich durchgeführt (NUA-Umweltanalytik, 2008). Auf ca. 600 m wurden die Kammspoiler auf einer bestehenden 3,9 m hohen Lärmschutzwand montiert. In 25 m, 50 m und 75 m Entfernung von der Lärmschutzwand wurde jeweils 3 m oberhalb der Oberkante der Lärmschutzwand, auf Höhe der Oberkante der Lärmschutzwand und 3 m unterhalb der Oberkante der Lärmschutzwand gemessen. Bei den Referenzmessungen ohne Aufsatz wurden die gleichen Mikrofonhöhen verwendet wie bei den Messungen mit Aufsatz.

In Tabelle 1 sind die Schallpegelminderungen angegeben, die bei vergleichbaren witterungsbedingten Ausbreitungsbedingungen gemessen wurden. Zum Vergleich finden sich in der Tabelle auch die Minderungen, die sich näherungsweise nach (DIN ISO 9613-2, 1999) für eine entsprechende Erhöhung der Wand berechnen lassen (d. h. die Differenzen der A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel bei Verringerung der Referenzhöhe).

Im Bericht wird herausgestellt, dass „die ermittelten Schallpegelminderungen trotz gemäßigter Wetterlage starke Schwankungen auf[weisen], wobei diese Schwankungen mit zunehmender Entfernung und zunehmender Abschattungswirkung durch das Schallhindernis größer werden.“ Insgesamt ergab „die Ermittlung der Differenz für die stündlichen Ermittlungsergebnisse bei vergleichbarer Wetterlage [...] mittlere Minderungen durch die Montage der Lärmschutzwand-Aufsatzelemente von 1,4 dB bis 2,2 dB. [...] Aufgrund der meteorologischen Unsicherheiten kann eine exakte Aussage über die Wirksamkeit der Lärmschutzwand-Aufsatzelemente durch die gegenständliche Untersuchungsmethode nicht getroffen werden“ (NUA-Umweltanalytik, 2008).

### 2.2 Möhler+Partner Ingenieure AG 2011

Von der Fa. Möhler+Partner Ingenieure AG wurden 2011 im Auftrag der DB Netz AG u. a. Messungen der akustischen Wirksamkeit des hier betrachteten Lärmschutzwandaufsatzes auf einer 2,5 m hohen Aluminium-Wand durchgeführt (DB Netze, 2012). Zum Vergleich wurde die Wand auf 3 m erhöht. Die Ergebnisse zeigen für IC-, Nahverkehrs- und Güterzüge weder eine erhöhte noch eine vergleichbare Wirksamkeit des Lärmspoilers gegenüber der Erhöhung der Wand. Im Bereich geringer Immissionshöhen (1,2 m und 3,6 m) wirkt die Erhöhung der Wand um 1 dB bis 2 dB besser als der Lärmspoiler. Die Ergebnisse sind für Strecken mit Schotterbau allge-

Geo- metrie	Messung NUA			Berechnung nach ISO			Differenz		
	25 m	50 m	75 m	25 m	50 m	75 m	25 m	50 m	75 m
+3 m	2,1	1,5	1,4	1,1	0,9	0,9	1,0	0,6	0,5
±0 m	2,0	1,7	2,1	1,0	0,9	0,8	1,0	0,8	1,3
-3 m	2,1	1,8	2,2	0,8	0,8	0,8	1,3	1,0	1,4

Tab. 1: Messergebnisse der Fa. NUA – gemessene Schallpegelminderung in dB im Vergleich mit berechneter Minderung nach ISO 9613-2

mein übertragbar, nicht unbedingt jedoch auf die Verhältnisse an Straßen.

Im Schlussbericht wird ausgeführt, dass die Hauptursache für die geringere Abschirmwirkung im kammartigen Aufbau des Aufsatzes liegen dürfte. Dort heißt es aber auch, dass „mit der Technologie [...] in geeigneten Anwendungsfällen nachträglich erforderlich werdende Verbesserungen der Schutzwirkung einer Schallschutzwand erreicht werden“ können. Zur Haltbarkeit heißt es weiter, dass „nach den zurzeit vorliegenden Versuchsergebnissen und dem Kenntnisstand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Dauerhaftigkeit des Absorber-Materials Polyolefin ein Risiko hinsichtlich der Dauerhaftigkeit“ verbleibt, insbesondere „weil keine Langzeiterfahrungen oder zeitäquivalente Laborversuche vorliegen“ (DB Netze, 2012).

### 2.3 AIT 2015

Von der Austrian Institute of Technology GmbH (AIT) wurden im Jahre 2015 Messungen der Schallbeugungsindex-Differenzen mit dem sogenannten „Adrienne-Verfahren“ nach ÖNORM EN 1793-4:2015 (entspricht (DIN EN 1793-4, 2015)) durchgeführt (CONTER et al., 2015). In Abweichung zur Norm wurde „[...] die Referenzhöhe mit Aufsatzelementen verringert, um der Referenzhöhe ohne Aufsatzelement der Bezugswand zu entsprechen. [...] Außerdem wurden zusätzliche Messpunkte in größerer Entfernung als die in der Norm vorhandenen definiert, die parallel ausgewertet wurden.“ Neben dem alten Modell des Aufsatzelements wurde eine neuere Variante getestet. Die mittlere Aufsatzhöhe des alten Modells beträgt 39 cm, die des neuen Modells hingegen 49 cm. Die Messungen wurden für die normgerechte und für die um die jeweiligen Aufsatzhöhen verringerte Referenzhöhe durchgeführt.

Es wurden Messungen an einer nicht normgerechten Bezugswand mit einer reflektierenden und einer absorbierenden Seite durchgeführt. Hier sollen nur die Ergebnisse der Messungen an der reflektierenden Seite verwendet werden. In Tabelle 2 und Tabelle 3 sind die Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzbänder für das alte bzw. neue Modell in 2 m und 3 m Entfernung aufgeführt.

Jeweils in der letzten Zeile sind die mit dem standardisierten Verkehrslärmspektrum für Straßen (DIN EN 1793-3, 1997) berechneten Einzahlanga-

ben zur Schallbeugungsindex-Differenz angegeben. Diese wird gemäß

$$DL_{\Delta DI} = -10 \cdot \lg \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{18} 10^{0,1L_j} 10^{-0,1\Delta DI_j}}{\sum_{j=1}^{18} 10^{0,1L_j}} \right\} \quad (1)$$

berechnet, wobei  $L_j$  das standardisierte Verkehrslärmspektrum für Straßen in 18 Terzen mit den Indizes  $j$  ist und  $\Delta DI_j$  die mit dem Adrienne-Verfahren gemessenen bzw. nach der ISO berechneten Schallbeugungsindex-Differenzen darstellen. Die durch die Wanderhöhung um 39 cm (mittlere Höhe des alten Aufsatzmodells) in 2 m bzw. 3 m hervorgerufene zusätzliche Pegelminderung beträgt nach ISO-Rechnung 3,6 dB bzw. 3,5 dB; nach den Messungen der AIT 5,5 dB bzw. 4,9 dB. Die durch die Wanderhöhung um 49 cm (mittlere Höhe des neuen Aufsatzmodells) in 2 m bzw. 3 m hervorgerufenen zusätzlichen Pegelminderung beträgt nach ISO-Rechnung 4,5 dB bzw. 4,3 dB; nach den Messungen der AIT 7,0 dB bzw. 6,2 dB.

Terzband in Hz	Entfernung 2 m		Entfernung 3 m	
	AIT	ISO	AIT	ISO
100	1,8	0,8	1,5	0,8
125	2,1	1,0	1,7	0,9
160	2,7	1,2	2,0	1,2
200	3,1	1,5	2,5	1,4
250	2,8	1,7	2,5	1,6
315	2,6	2,1	2,1	1,9
400	2,4	2,4	1,7	2,3
500	2,6	2,8	2,1	2,6
630	4,1	3,1	3,2	3,0
800	5,0	3,5	4,9	3,4
1.000	5,6	3,9	4,9	3,8
1.250	8,3	4,3	6,8	4,2
1.600	9,5	4,7	8,9	4,6
2.000	10,6	5,0	9,7	4,9
2.500	12,3	5,3	10,7	5,2
3.150	12,8	5,6	12,1	5,5
4.000	14,1	5,8	12,4	5,8
5.000	14,3	6,1	12,9	6,1
$DL_{\Delta DI}$	5,5	3,6	4,9	3,5

Tab. 2: Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DI_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DI}$  für das alte Aufsatzmodell in dB – Ergebnisse der AIT-Messung bzw. Rechnung nach ISO 9613-2

Terzband in Hz	Entfernung 2 m		Entfernung 3 m	
	AIT	ISO	AIT	ISO
100	2,5	1,2	2,0	1,1
125	3,0	1,4	2,1	1,3
160	3,8	1,7	2,5	1,6
200	4,2	2,0	3,2	1,8
250	4,2	2,3	3,9	2,2
315	4,3	2,7	3,7	2,5
400	4,8	3,1	3,8	2,9
500	4,9	3,5	4,5	3,4
630	6,1	4,0	5,1	3,8
800	7,0	4,5	6,3	4,3
1.000	7,3	4,9	6,4	4,7
1.250	8,4	5,3	7,5	5,1
1.600	9,6	5,7	8,3	5,6
2.000	10,4	6,1	9,4	6,0
2.500	12,6	6,4	11,1	6,3
3.150	13,5	6,8	12,8	6,7
4.000	16,2	7,0	14,0	7,0
5.000	16,5	7,3	15,2	7,2
$DL_{\Delta DI}$	7,0	4,5	6,2	4,3

Tab. 3: Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DI_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DI}$  für das neue Aufsatzmodell in dB – Ergebnisse der AIT-Messung bzw. Rechnung nach ISO 9613-2

### 3 Charakterisierung des Aufsatzmaterials

#### 3.1 Materialbeschreibung

Die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Lärmschutzwandaufsätze werden aus dem Material „STRATOCELL WHISPER“ von (SealedAir) hergestellt und sind in Bild 1 dargestellt. Es handelt sich um einen grobporigen (Strukturgröße ca. 10 mm) Polyethylen-Schaumstoff. Das Material hat zwei verschiedenen Oberflächenstrukturen, eine offene und eine geschlossene. Die Kammerstruktur im inneren des Materials ist durch Perforationen untereinander verbunden. Die Aufsätze bestehen aus zwei verschiedenen Elementen mit unterschiedlicher Geometrie. Die Geometrie „breit“ hat eine Breite von 423 mm, die Geometrie „schmal“ eine Breite von 262 mm. Beide Geometrien haben eine Höhe von 500 mm und eine Dicke von 50 mm. In dem fertigen Lärmschutzwand-Aufsatz folgen auf ein breites Element jeweils zwei schmale Elemente.

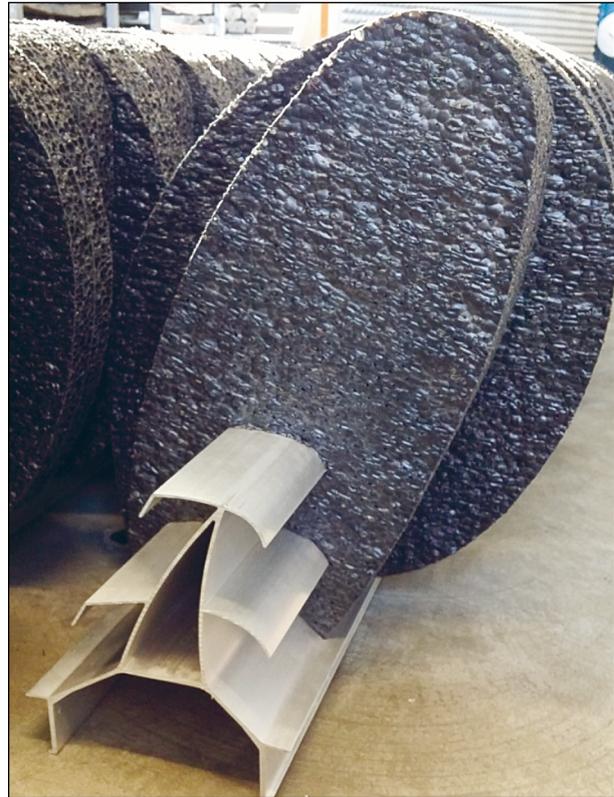


Bild 1: Untersuchtes Lärmschutzwand-Aufsatzsystem

#### 3.2 Materialtests

##### Beständigkeit gegenüber Frost-Tau-Wechsel

Für die Untersuchung der Temperaturbeständigkeit wurde eine Klimakammer des Typs WT-1500/40 der Fa. Weiss Umwelttechnik GmbH verwendet (siehe Bild 2). Diese ermöglicht Versuche im Temperaturbereich von  $-40\text{ °C}$  bis  $+180\text{ °C}$ .

Für die Untersuchung wurde ein Zyklus gewählt, welcher nicht nur den durchschnittlichen Temperaturbereich im Winter umfasst, sondern auch extreme Temperaturen, wie sie in Deutschland auftreten können, berücksichtigt (siehe Bild 3). Der Zyklus dauert 23 h und 15 min mit einer angeschlossenen Dauer von 45 min zur Probenvorbereitung. Innerhalb jedes Zyklus werden drei vollständige Frost-Tau-Wechsel vollzogen.

Für den Testzyklus wurden die Proben, je zwei breite und zwei schmale Elemente, zunächst in Wasser eingetaucht, um einen Starkregen zu Beginn des Testzyklus zu simulieren. Daraufhin wurden die Proben in die Klimakammer eingebracht.

Die Tauphase mit  $+20\text{ °C}$  wurde gewählt um den Tauvorgang zu beschleunigen. Die lange Phase mit  $+20\text{ °C}$  am Ende des Zyklus ist gewählt worden, um



Bild 2: Für die Untersuchung der Temperaturbeständigkeit verwendete Klimakammer

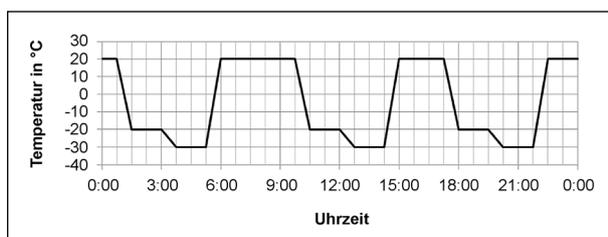


Bild 3: Zeitlicher Temperaturverlauf des Testzyklus für Frost-Tau-Wechsel

die Proben vor dem erneuten eintauchen in Wasser zuverlässig aufzutauen.

Die Proben durchliefen zehn Testzyklen, dies entspricht 30 Frost-Tau-Wechseln, und zeigten keine sichtbaren Änderungen am Material.

### Hitzebeständigkeit

Für die Untersuchung der Hitzebeständigkeit wurden dieselbe Klimakammer und dieselben Proben verwendet wie bei der Untersuchung der Beständigkeit gegenüber Frost-Tauwechsel. Die in (AIDICO, 2013) durchgeführten Untersuchungen hatten



Bild 4: UV-Bestrahlungsgerät der BAST

eine Spitzentemperatur von 60 °C. Um eine Einschätzung dieses Temperaturwertes zu bekommen, wurde zunächst ein Element des Lärmschutzwand-Aufsatzes der normalen Sonnenstrahlung ausgesetzt. Dies erfolgte an mehreren wolkenlosen Sommertagen im August mit einer Lufttemperatur von 28 °C bis 31 °C. Dabei erhitze sich die Probe auf bis zu 81 °C auf. Daher wurde für den Hitze-Test eine Temperatur von 85 °C gewählt und die Probe für 250 h auf dieser Temperatur gehalten.

Der Hitze-Test erfolgte nach dem Frost-Tauwechsel und zeigte keine sichtbaren Änderungen am Material.

### UV-Bestrahlung

Bei dem Gerät zur UV-Bestrahlung handelt es sich um eine Eigenanfertigung der BAST (siehe Bild 4). In einem Metallrahmen befindet sich ein Halterungsarray für 2 x 4 UV-Strahler. Verwendet werden Strahler der Fa. OSRAM der Bauart Ultra-Vitalux mit einer Leistungsaufnahme von jeweils 300 W. Davon entfallen je Lampe 13,6 W auf UV-A-Strahlung und 3,0 W auf UV-B (OSRAM). Dies entspricht einer Strahlungsleistung von  $P_{UVA} = 1.073,6 \frac{W}{m^2}$  und  $P_{UVB} = 237,8 \frac{W}{m^2}$ . Die auf der Erdoberfläche

eintreffende Strahlungsleistung der Sonne entspricht bei klarem Himmel und senkrechtem Einfall  $P_{UVA \odot} \approx 62,5 \frac{W}{m^2}$  und  $P_{UVB \odot} \approx 5,5 \frac{W}{m^2}$  (Fachverband für Strahlenschutz e. V., 2012). Damit ergibt sich ein zeittraffender Faktor von 17 für UV-A- bzw. 43 für UV-B-Strahlung. Bei einer jährlichen Sonnenscheindauer von 1.600 h (für Köln im Jahr 2015) werden mit UV-Bestrahlungszeit von 2.000 h ca. 20 Jahre UV-A-Bestrahlung bzw. über 50 Jahre UV-B-Bestrahlung simuliert.

Die Fa. AIDICO führte im Auftrag des Herstellers des Aufsatzmaterials Untersuchungen zur Alterung des Materials in einer QUV-Kammer durch (AIDICO, 2013). Dabei wurde das Verhalten des Absorptionsgrads und des Elastizitäts-Moduls bestimmt. Diesem Bericht folgend wurde eine UV-Gesamtbestrahlungszeit von 2.000 h festgelegt. Untersuchungen bzgl. der Veränderung von mechanischen Materialeigenschaften wurden nicht durchgeführt.

Komponente	Seriennummer
Rohrkomponenten groß: UA1117 & UA1119	
Rohrkomponenten klein: UA1118 & UA 1120	
2 Mikrofoneinheiten BK 4187 + BK 2670	2282614 + 2340173
2282615 + 2249562	
Kalibrator BK 4231	2115341
Frontend BK Type 3160-A-042	3160-105899
Verstärker BK Power Amplifier Type 2718	2308695
Software BK Pulse Vers. 19.0.0.128	
Barometer BK UZ0004	
Thermo-/Hygrometer Delta Ohm HD8901	2809959093

Tab. 4: Komponenten des Messsystems Brüel & Kjær Typ 4206 (KUNDT'sches Rohr)



Bild 5: KUNDT'sches Rohr für einen Probendurchmesser von 100 mm

### 3.3 Absorptionseigenschaften

#### Messungen im KUNDT'schen Rohr

Die Messungen des Absorptionsgrades  $\alpha$  des Probenmaterials wurden mit einem KUNDT'schen Rohr (Impedanz-Messrohr der Fa. Brüel & Kjær Typ 4206, Bild 5) durchgeführt. Die verwendeten Messmittel sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Das Messsystem wurde bei diesen Untersuchungen in zwei Messmodi betrieben – mit einem Probendurchmesser von 100 mm und einem Probendurchmesser von 28 mm. Der Messbereich des Messsystems liegt für die größeren Proben zwischen 50 Hz und 1.600 Hz und zwischen 500 Hz und 6.400 Hz für den kleineren Probendurchmesser. Ursprünglich sollte der Absorptionsgrad  $\alpha$  des Materials von 100 Hz bis 6.400 Hz bestimmt werden. Wie sich aber im Laufe der Untersuchung an der starken Streuung der Messergebnisse zeigte, ist das Material aufgrund seiner groben Struktur nicht für die Messung mit 28 mm Probendurchmesser geeignet. Daher wurde die Untersuchung der Materialeigenschaften auf den Frequenzbereich 50 Hz bis 1.600 Hz beschränkt. Für die abschließende Auswertung des Absorptionsgrades wurde der Frequenzbereich in Terzen mit Mittenfrequenzen von 63 Hz bis 1.600 Hz zusammengefasst.

#### Probengewinnung und Streuung

Aus einer Materialprobe des Aufsatzschaumstoffs wurden vorab acht Probenkörper hergestellt: vier große Proben mit einem Durchmesser von 100 mm (bezeichnet als  $P_{g1...4}$ ) und vier kleine Proben mit einem Durchmesser von 28 mm ( $P_{k1...4}$ ). Diese wurden per Hand mit einem Gerät zur Styroporverarbeitung (geheizter Schneidedraht) nach Schablone ausgeschnitten. Die Proben wiesen nach diesem Bearbeitungsschnitt jedoch unregelmäßige Ränder auf.

Für beide Probengrößen wiesen jeweils zwei Probenkörper die Oberflächenstruktur der geschlossenen Materialoberfläche ( $P_{g1+2}$ ,  $P_{k1+2}$ ) und zwei die der offenen Oberfläche ( $P_{g3+4}$ ,  $P_{k3+4}$ ) als Stirnseite der zylinderförmigen Probe auf (siehe Bild 6).

Für jede Probe wurden vier Messungen, jeweils zwei pro Seite, durchgeführt. Nach Erhalt der vollständigen Lärmschutzwandaufsätze wurden neue Proben mit einem speziell angefertigten Stanz-Werkzeug (siehe Bild 7) hergestellt. Dadurch konnten die unregelmäßigen Ränder vermieden werden.

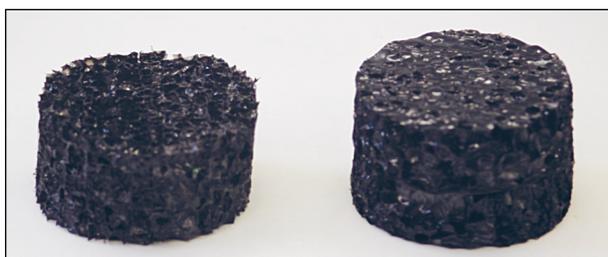


Bild 6: Proben für das KUNDT'sche Rohr mit einem Durchmesser von 100 mm, links mit offener und rechts mit geschlossener Oberfläche



Bild 7: Stanzwerkzeug zur Herstellung von Proben für das KUNDT'sche Rohr mit einem Durchmesser von 100 mm

Zur Charakterisierung der Streuung wurde die Standardabweichung  $\sigma$  der Proben bestimmt. Dafür wurden jeweils zehn große ( $P_{gSD1...10}$ ) und zehn kleine Proben ( $P_{kSD1...10}$ ) mit geschlossenen Oberflächen hergestellt. Für jede Probe wurden zwei Messungen des Absorptionsgrades  $\alpha$  vorgenommen. Bei diesen Messungen zeigte sich, wie oben bereits erwähnt, dass die Proben mit kleinem Durchmesser ( $P_{kSD1...10}$ ) eine hohe Streuung aufwiesen.

Um die Ursache dieser Streuung zu ergründen, wurde eine der Proben,  $P_{kSD1}$ , ausgewählt und die Streuung bei wiederholten Messungen ermittelt. Dazu wurde der Absorptionsgrad  $\alpha$  in zehn Messungen, jeweils in derselben Orientierung bestimmt. Aus diesen Werten wurden wiederum die Standardabweichungen  $\sigma$  sowie die Minimal- und die Maximalwerte bestimmt. Dieselbe Probe wurde erneut zehnmal in derselben Orientierung untersucht, aber nun wurde darauf geachtet, die Probe absicht-

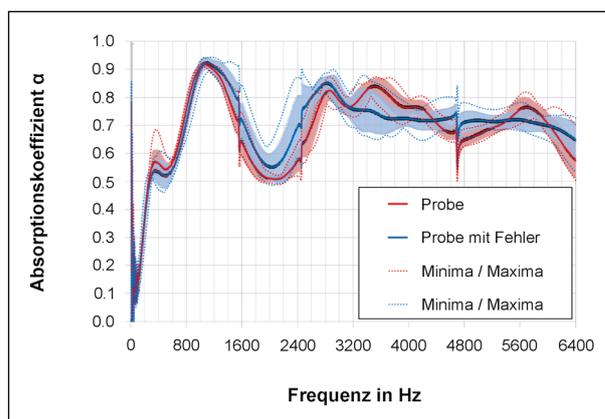


Bild 8: Absorptionsgrad  $\alpha$  (dicke Linie) mit Standardabweichung  $\sigma$  (schraffierter Bereich) für korrekt (rot) und fehlerhaft (blau) eingesetzte Proben

lich „unsauber“, z. B. verkantet oder nicht bündig, in das Messsystem einzubringen, um die Auswirkungen von Fehlern zu erfassen. Dabei wurde die Probe so eingebracht dass verschiedene, extreme Fehler dargestellt werden konnten:

- Probe fehlerhaft in Längsrichtung in den Probenhalter eingesetzt. Toleranzbereich  $\pm 0,5$  cm und  $\pm 1,0$  cm,
- Luftspalt von 0,5 cm und 1,0 cm zwischen Rückseite der Probe und schallhartem Abschluss des Probenhalters,
- Übermäßige Komprimierung der Probe beim Einsetzen in den Probenhalter,
- Verkanten der Probe beim Einsetzen in den Probenhalter.

In Bild 8 sind Absorptionsgrad  $\alpha$  mit Standardabweichung  $\sigma$  für korrekt und fehlerhaft eingesetzte Proben dargestellt. Bei den Sprüngen bei  $\approx 1.550$  Hz,  $\approx 2.450$  Hz und  $\approx 4.700$  Hz handelt es sich um Rohrresonanzen und somit nicht um Eigenschaften der Proben.

Anschließend wurde in fünf Messungen für beide Seiten von zwei der Proben  $P_{kSD1+2}$  der Absorptionsgrad  $\alpha$  gemessen und daraus für jede der Seiten der Mittelwert gebildet. Diese Kurven wurden mit der Standardabweichung  $\sigma$  verglichen (siehe Bild 9).

Dabei zeigt sich, dass die einzelne Probe eine sehr geringe Standardabweichung  $\sigma$  aufweist, während das  $\sigma$  mehrerer Proben größer ausfällt. Beim Vergleich der „normalen“ Proben mit den fehlerbehafteten zeigt sich, dass das  $\sigma$  der fehlerbehafteten Pro-

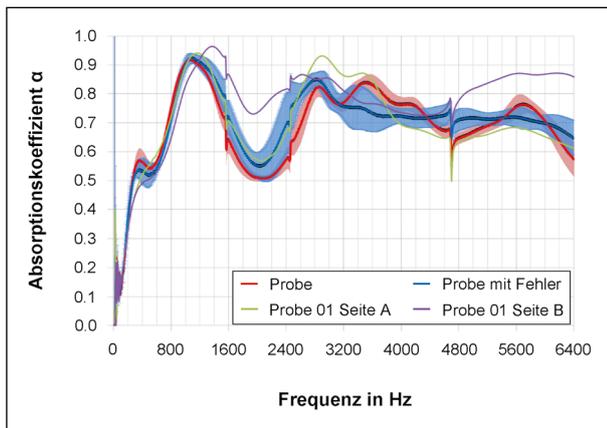


Bild 9: Absorptionsgrad  $\alpha$  und Standardabweichung  $\sigma$  der Proben

ben größer und im Frequenzbereich verschoben ist. Die starken Abweichungen der verschiedenen Proben (Minima/Maxima in Bild 8) lassen sich dadurch nicht erklären, da diese sowohl außerhalb von  $\sigma$  der normalen als auch der fehlerbehafteten Proben liegen.

Messungen an Proben aus einem anderen, feinporigem Material lassen den Schluss zu, dass die starke Streuung der Proben mit einem Durchmesser von 28 mm von der groben Materialstruktur herührt. Die Strukturgröße der Kammern des Materials liegt bei  $\sim 1$  cm, was einem Drittel des Probendurchmessers entspricht. Beim Herausschneiden bzw. Ausstanzen der Proben kommt es deswegen zu großen Varianzen in der Struktur der Proben, da der Hohlraumgehalt wie auch die Anzahl der perforierten Hohlräume stark variiert. Daraus resultiert die hohe Variabilität der unterschiedlichen Proben  $P_{kSD1...10}$ .

Die Variabilität einer einzelnen Probe  $P_{kSD1}$  rührt vermutlich von der hohen Komprimierbarkeit des Materials her. Jedes Mal, wenn die Probe in den Probenhalter eingesetzt wird, wird das Material geringfügig anders komprimiert. Dadurch ändert sich auch die Geometrie der Hohlräume und die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ist nicht mehr gegeben. Aus diesem Grund wurde nur der Frequenzbereich von 100 Hz bis 1.600 Hz für die Auswertung der Alterung des Materials herangezogen, da bei den Proben mit einem Durchmesser von 100 mm diese Variabilität wesentlich geringer ausfällt.

Neben dem Absorptionsgrad wurden zur Nutzung in den Simulationen in Kapitel 5 die Daten für die Admittanz aus den Proben  $P_{g1...4}$  und  $P_{k1...4}$  ermittelt

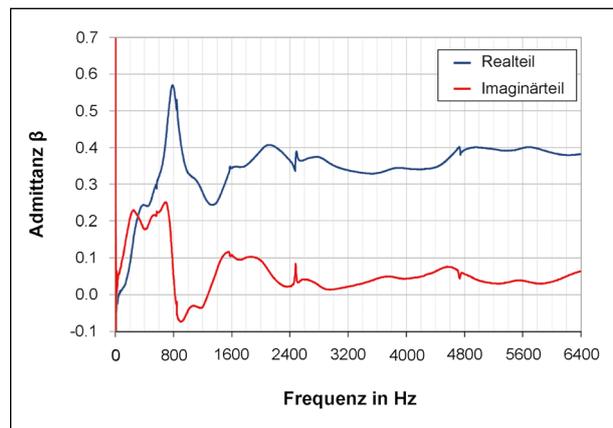


Bild 10: Admittanz der Proben als Eingangsgröße für die Simulationen

(siehe Bild 10). Die Admittanz (als Kehrwert der Impedanz) wird in den Programmen SYSNOISE und ANSYS als Materialeigenschaft benötigt.

### Absorptionseigenschaften nach Materialbelastung

Das Ziel der Untersuchung war die Ermittlung der akustischen Eigenschaften des Aufsatzmaterials in Abhängigkeit von eventuell materialverändernden Umwelteinflüssen wie Hitze, Frost-Tauwechsel und UV-Bestrahlung. Die Absorption des Materials im Auslieferungszustand wurde mit Messungen verglichen, die durchgeführt wurden nachdem die Proben den verschiedenen Umwelteinflüssen ausgesetzt waren. Dazu wurde eine Gruppe der Proben (Grp. 1) insgesamt 2.000 h einer UV-Strahlung ausgesetzt. Die zweite Gruppe (Grp. 2) wurde zusätzlich zehn Frost-Tau-Zyklen und 250 h Hitze ausgesetzt (siehe oben).

Der Absorptionsgrad des Materials veränderte sich nach der Materialbelastung nur geringfügig. Entgegen erster Erwartungen zeigte sich eine leichte Erhöhung des Absorptionsgrades bei Frequenzen über 1.100 Hz (siehe Tabelle 5 und Bild 11).

Die Stundenangabe bei den Ergebnissen bezieht sich auf die jeweilige Dauer der UV-Bestrahlung bis zu dieser Messung. Die Werte für die 0 h Messung sind für beide Gruppen gleich. Neben den Messungen bei 2.000 h sind für Gruppe 1 die Werte bei 500 h angegeben, dies ist die erste Teilmessung. Bei Gruppe 2 wurde diese bereits bei 250 h durchgeführt, da dies der Zeit entspricht, die diese dem Hitzeeinfluss ausgesetzt war, sowie näherungsweise der Dauer der Frost-Tau-Zyklen. Die Spalten „Differenz Grp.1“ bzw. „Differenz Grp. 2“ geben die

Differenzen der Werte des Absorptionskoeffizienten bei 2.000 h zu den Werten bei 0 h an.

Die maximale Veränderung des Absorptionskoeffizienten liegt für Gruppe 1 bei 10,4 % im 1.250 Hz-Terzband, für Gruppe 2 bei 5,1 % im 1.600 Hz-Terzband. Das Material überstand alle Versuche ohne wesentliche sichtbare Veränderungen. Untersuchungen der Materialkonstanten wie Sprödigkeit und Elastizität wurden im Rahmen dieser Untersuchung nicht vorgenommen. Aus welchem Grund diese Änderung des Absorptionsgrades eintritt wurde nicht untersucht. An der Oberfläche der Proben zeigte sich aber, dass die Perforationslöcher größer wurden und ausfransten.

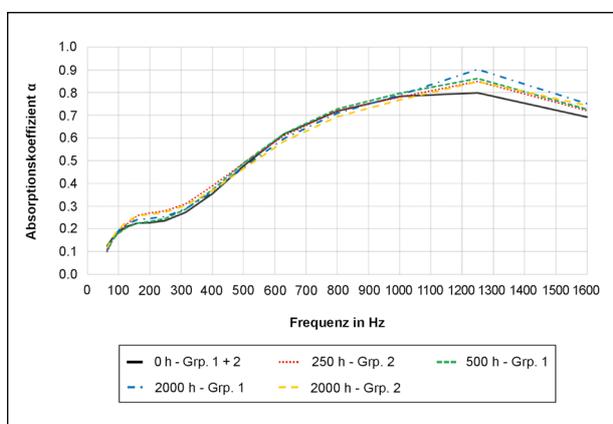


Bild 11: Frequenzverlauf der Absorptionskoeffizienten aus den Materialtests

## 4 Messungen der akustischen Dämpfung

### 4.1 Messungen im Nah- und Fernbereich

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH (Acoustic Engineering Dresden, AED) beauftragt, die Lärmschutzwandaufsätze im Nahbereich gemäß (DIN EN 1793-4, 2015) und im Fernbereich mit einem Mikrofonarray akustisch zu untersuchen. Am Messort standen drei parallele freistehende Wände zur Verfügung, wovon eine für die Messungen genutzt wurde (siehe Bild 12). Für die Messungen wurde das neue Aufsatzmodell verwendet.



Bild 12: Messort mit drei parallelen Wänden zur Untersuchung durch AED

f in Hz	0 h Grp. 1+2	250 h Grp. 2	500 h Grp. 1	2.000 h Grp. 1	Differenz Grp. 1	2.000 h Grp. 2	Differenz Grp. 2
63	0,125	0,100	0,106	0,108	-0,017	0,117	-0,008
80	0,159	0,150	0,151	0,152	-0,007	0,162	0,003
100	0,186	0,190	0,181	0,191	0,005	0,198	0,012
125	0,210	0,220	0,205	0,221	0,011	0,231	0,021
160	0,225	0,260	0,225	0,241	0,016	0,258	0,033
200	0,227	0,270	0,232	0,245	0,018	0,264	0,037
250	0,236	0,280	0,246	0,254	0,018	0,273	0,037
315	0,273	0,310	0,288	0,290	0,017	0,304	0,031
400	0,355	0,390	0,373	0,363	0,008	0,370	0,015
500	0,477	0,490	0,490	0,472	-0,005	0,466	-0,011
630	0,618	0,610	0,620	0,598	-0,020	0,585	-0,033
800	0,719	0,720	0,728	0,709	-0,010	0,694	-0,025
1.000	0,783	0,780	0,798	0,790	0,007	0,769	-0,014
1.250	0,799	0,850	0,863	0,903	0,104	0,849	0,050
1.600	0,693	0,720	0,726	0,752	0,059	0,744	0,051

Tab. 5: Absorptionskoeffizient für verschiedene Materialbelastungsarten und -zeiten für den Frequenzbereich von 63 Hz bis 1.600 Hz

Die Geometrie des Messortes wird charakterisiert durch:

- Länge x Höhe x Dicke der Wand = 75 m x 3,4 m x 0,16 m,
- horizontaler Abstand von Wand zu benachbarter paralleler Wand = 18 m,
- horizontaler Abstand zwischen Wand und Straße >25 m.

In Bild 13 bzw. Bild 14 sind die verwendeten Messanordnungen für die Nahfeld- bzw. Fernfeldmessungen zu sehen.

In Bild 15 und Bild 16 sind die Geometrien der Lautsprecherpositionen und Mikrofonanordnungen der Nahfeldmessungen ohne bzw. mit Aufsatz nach DIN EN 1793-4 dargestellt.

Die Nahfeld-Messungen wurden normgemäß durchgeführt. Gemessen wurde der spektrale Schallbe-

gungsindex  $DI$  der Lärmschutzwand ohne und mit Aufsatz, woraus sich dann die spektrale Schallbeugungsindex-Differenz  $\Delta DI$  des Aufsatzes berechnet. Die Referenzhöhe  $h_{ref,ac}$  wurde als Distanz vom Boden bis zur Oberkante des Schirmaufsatzes bestimmt. In beiden Bildern bezeichnen „S“ die Positionen der Lautsprecher, wobei „S1“ bzw. „S2“ die Positionen 0,15 m bzw. 0,5 m unterhalb der Schirmkante und jeweils 2 m horizontal senkrecht von der Schirmkante entfernt kennzeichnen. „S3“ bzw. „S4“ repräsentieren die entsprechenden Positionen unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur Schirmkante.

Die Mikrofonpositionen sind mit „M“ bezeichnet. Wie für die Sendepositionen gilt ein horizontaler senkrechter Abstand von 2 m. Dabei bezeichnen „M1“ bzw. „M2“ die Positionen 0,5 m und 0,25 m oberhalb der Schirmkante, „M3“ die Position auf Höhe der Schirmkante und „M4“ bzw. „M5“ die Positionen 0,25 m bzw. 0,50 m unterhalb der Schirmkante.



Bild 13: Messanordnung für die Nahfeldmessung durch AED



Bild 14: Messanordnung für die Fernfeldmessung durch AED

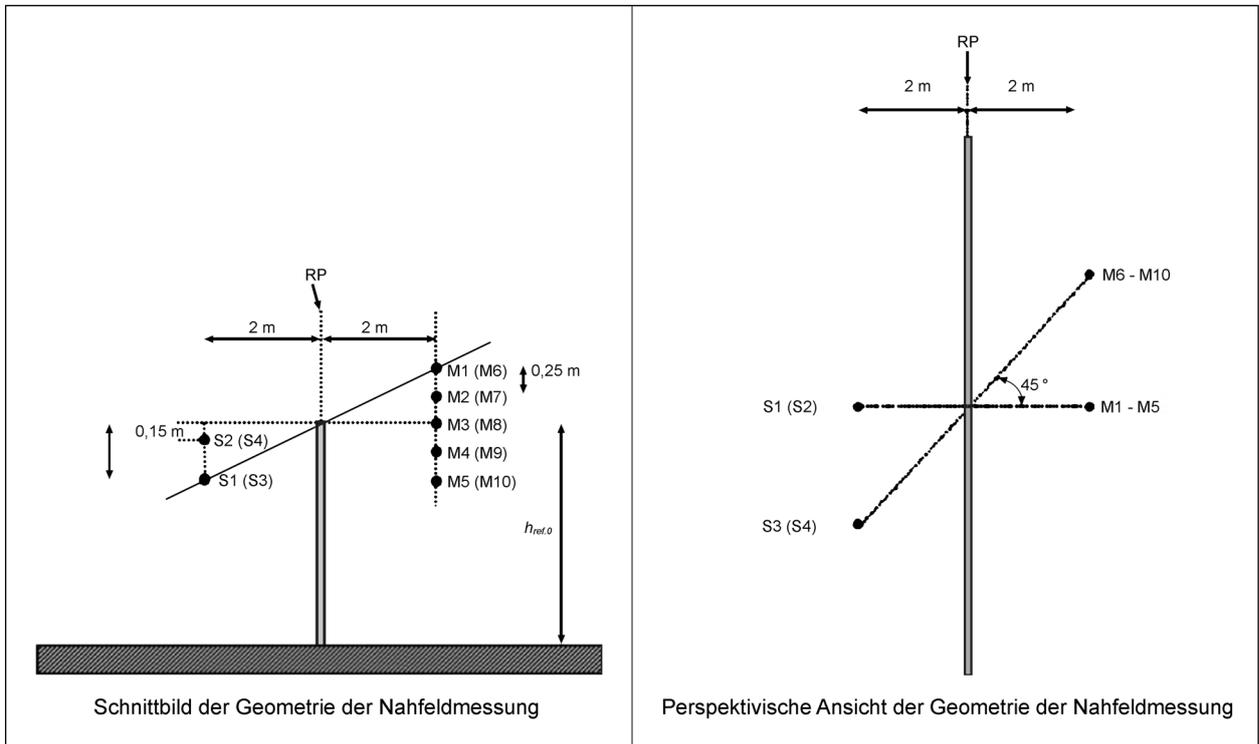


Bild 15: Geometrie der Lautsprecherpositionen (S) und Mikrofonanordnungen (M) der Nahfeldmessung ohne Aufsatz nach DIN EN 1793-4 (Quelle: DIN EN 1793-4, 2015)

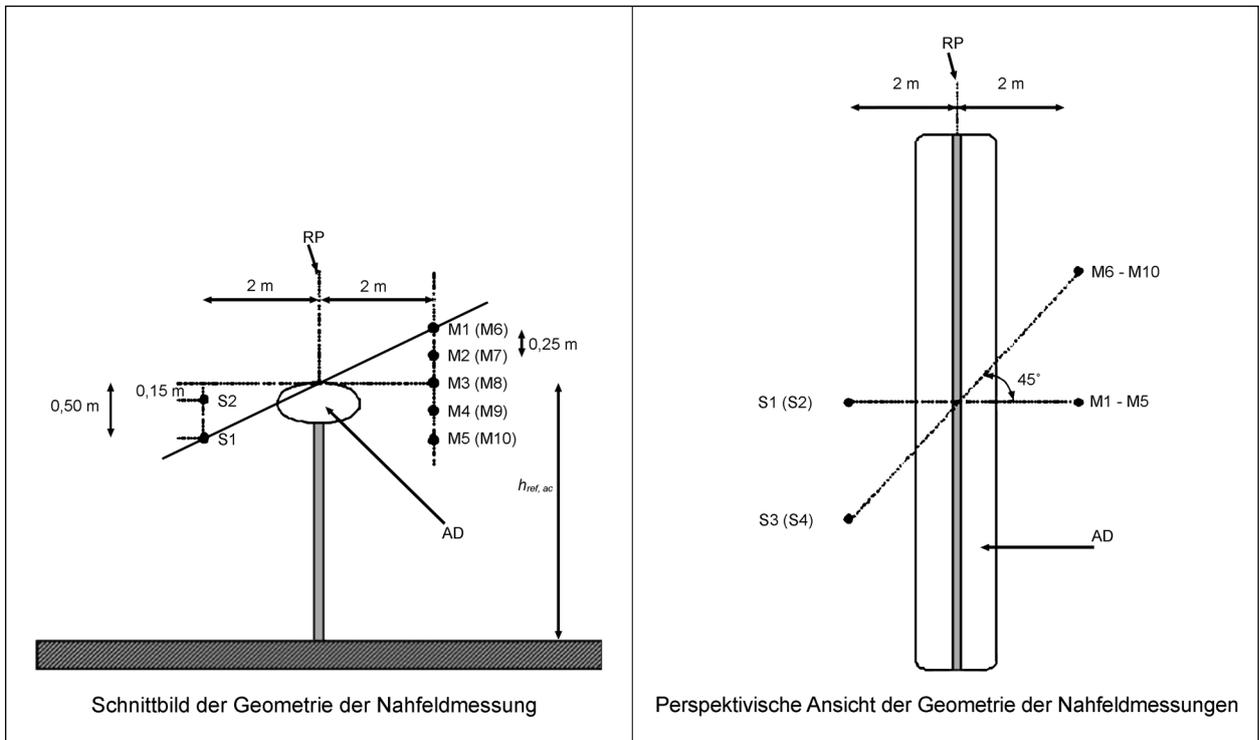


Bild 16: Geometrie der Lautsprecherpositionen (S) und Mikrofonanordnungen (M) der Nahfeldmessung mit Aufsatz nach DIN EN 1793-4 (Quelle: DIN EN 1793-4, 2015)

In Tabelle 6 sind die gemessenen Schallbeugungsindex-Differenzen für die Senderpositionen „S1“ bis „S4“ und gemittelt über alle Senderpositionen (S1-S4) zusammengefasst. Die energetische Mittelung über die Senderpositionen (S1-S4) erfolgte dabei

Terzband in Hz	S1	S2	S3	S4	S1-S4
100	-0,7	-0,5	-1,2	1,9	0,1
125	-1,8	-0,1	0,0	0,1	-0,3
160	0,4	-0,2	0,7	0,9	0,4
200	0,5	-1,0	2,0	2,1	0,9
250	-0,2	-0,2	0,5	0,6	0,2
315	1,0	0,1	0,5	0,6	0,5
400	0,5	-0,1	0,6	0,6	0,3
500	0,7	0,0	0,6	0,5	0,4
630	0,5	-0,1	0,6	0,4	0,3
800	0,4	-0,2	0,4	0,4	0,2
1.000	0,4	-0,3	0,4	0,6	0,2
1.250	0,2	-0,5	0,7	0,4	0,1
1.600	-0,2	-0,6	0,6	0,5	0,0
2.000	-0,2	-0,4	0,8	0,8	0,2
2.500	-0,1	-0,2	1,8	1,4	0,5
3.150	0,3	-0,2	2,6	2,4	0,9
4.000	1,1	-0,5	4,0	2,7	1,1
5.000	0,1	-1,1	4,5	3,3	0,8
$DL_{\Delta DI}$	0,2	-0,3	0,8	0,7	0,3

Tab. 6: Ergebnis der Nahfeldmessung, Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DI_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DI}$  nach Gl. (1) in dB für den Lärmschutzwandaufsatz

schon bei den Einzeldifferenzen der Terzen jeweils für M1 bis M5. Die Berechnung der Schallbeugungsindex-Differenzen und die Mittelung über die Senderpositionen sind dabei nicht kommutativ, d. h. die Reihenfolge ist zu beachten.

In Bild 17 ist die Geometrie der Lautsprecherposition und des horizontal ausgerichteten Linienarrays der Fernfeldmessungen ohne bzw. mit Aufsatz dargestellt. Für beide Aufbauten wurde in der Fernfeldmessung der spektrale Schallimmissionspegel gemessen, um daraus die spektrale Einfügedämpfung des Aufsatzes – mit und ohne Erhöhung der effektiven Schirmhöhe – zu berechnen.

Die Einfügedämpfung  $D_E$  des Wandaufsatzes entspricht der Differenz des Immissionserschalldruckpegels hinter der Wand ohne und mit Wandaufsatz. Der direkte Vergleich der Einfügedämpfung  $D_E$  mit der Wirkung des Wandaufsatzes im Fernbereich erfordert eine Korrektur  $\Delta D_E$  infolge der Wanderhöhung durch Installation des Aufsatzes auf der Wand. Die Korrektur entspricht der Differenz des Abschirmmaßes  $\Delta D_z$  der Wand mit und ohne Erhöhung der Wand durch den Aufsatz.

Das Abschirmmaß  $D_z$  ist nach (DIN ISO 9613-2, 1999) definiert als:

$$D_z = 10 \cdot \lg \left[ C_1 + \frac{C_2}{\lambda} \cdot C_3 \cdot z \cdot K_w \right] \text{ dB} \quad (2)$$

Dabei ist die Witterungskorrektur  $K_w$  gegeben als:

$$K_w = \exp \left[ -\frac{1}{R_1} \cdot \sqrt{\frac{R_Q \cdot R_E \cdot R_1}{2z}} \right] \text{ dB} \quad (3)$$

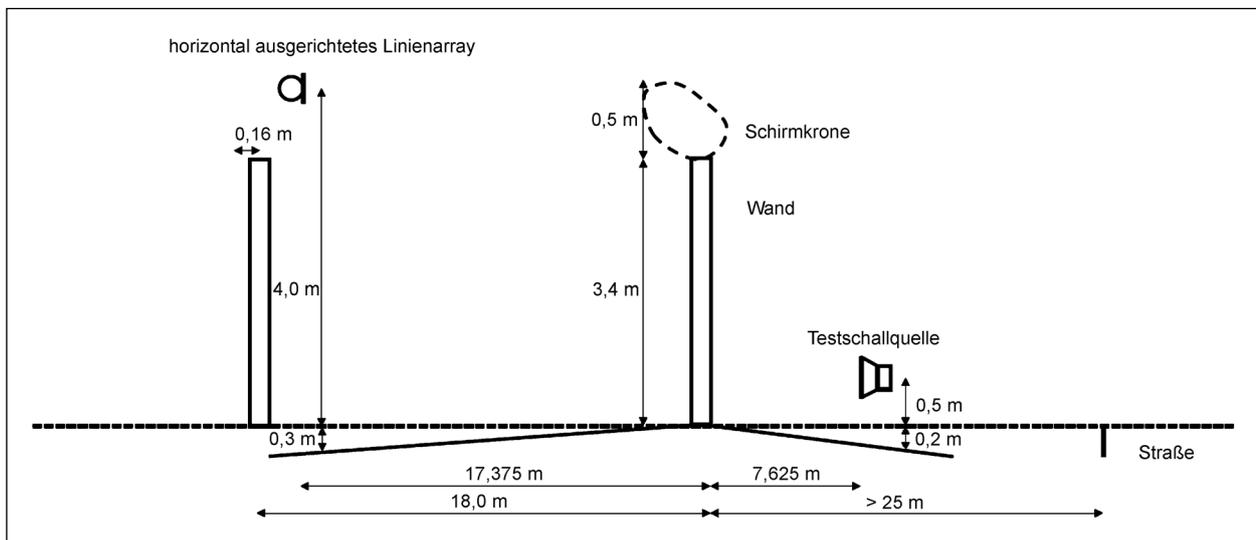


Bild 17: Geometrie der Lautsprecherpositionen und des horizontal ausgerichteten Linienarrays bei der Fernfeldmessung ohne bzw. mit Aufsatz

Der Umweg  $z$  ist gegeben durch:

$$z = R_Q + R_E - R_1 \quad (4)$$

Die Konstanten  $C_1 = 3$ ,  $C_2 = 20$  und  $C_3 = 1$  beziehen sich auf die Geometrie der Anordnung (Einfachbeugung ohne implizite Bodenreflexion). In Bild 18 ist die Geometrie zur Bestimmung der Differenz des Abschirmmaßes  $\Delta D_z$  mit und ohne Aufsatz dargestellt. In Tabelle 7 ist die gemessene Einfügedämpfung im Fernbereich ohne bzw. mit dieser Korrektur angegeben.

Insgesamt kommt AED zu dem folgenden Ergebnis: Die Gesamt-Einfügedämpfung beträgt im Nahbe-

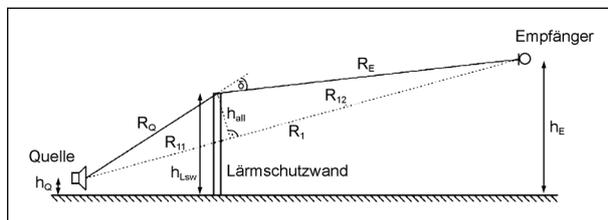


Bild 18: Geometrie zur Bestimmung der Differenz des Abschirmmaßes  $\Delta D_z$

Terzband in Hz	ohne Korrr.	mit Korrr.
100	-0,5	-1,4
125	0,1	-0,9
160	2,2	1,1
200	2,2	1,0
250	4,1	2,8
315	-2,0	-3,4
400	2,2	0,7
500	2,7	1,1
630	4,6	2,9
800	4,5	2,7
1.000	1,5	-0,3
1.250	5,4	3,5
1.600	0,9	-1,0
2.000	4,9	3,0
2.500	3,2	1,2
3.150	6,4	4,4
4.000	5,9	3,9
5.000	6,7	4,7
$DL_{\Delta DE}$	2,7	1,0

Tab. 7: Ergebnis der Fernfeldmessung, Einfügedämpfungen für den Lärmschutzwandaufsatz in dB mit und ohne Korrektur der Wanderhöhung sowie Summe  $DL_{\Delta DE}$  nach Gl. (5) in dB

reich 0,3 dB und im Fernbereich ohne Korrektur infolge der Wanderhöhung durch den Wandaufsatz 2,7 dB bzw. mit Korrektur infolge der Wanderhöhung durch den Wandaufsatz 1,0 dB. Es ergeben sich ähnliche Messergebnisse für den Gesamtpegel der Einfügedämpfung des Wandaufsatzes zwischen Nahbereich und Fernbereich. Es gibt Unterschiede infolge von Ausbreitungseffekten. Der Einbruch der Einfügedämpfung bei 1,6 kHz ist in beiden Messergebnissen zu erkennen. Im Nahbereich sind deutliche Unterschiede der Einfügedämpfung für senkrechte und schräge Beschallung zu erkennen. Dies kann mit der Geometrie des Aufsatzes (breiter Aufsatz, Doppelbeugung) erklärt werden.

## 4.2 Modellmessungen in der HaMt

### Messaufbau

Die Aufsätze (in der neueren Variante mit einer mittleren Aufsatzhöhe von 49 cm) wurden in der Halle für akustische Modelltechnik (HaMt) auf eine 1 m hohe massive Holzwand aufgebaut. Diese vergleichsweise niedrige Höhe musste aufgrund der begrenzten Hallenhöhe gewählt werden. Eine ursprünglich geplante maßstäbliche Messung (Maßstab 1:4 oder 1:8) scheiterte an der Suche nach geeignetem skalierten Material für die Aufsätze. Damit wirklichkeitsnahe Messungen durchgeführt werden können, muss das in skalierten Messungen verwendete Absorptionsmaterial eine dem Maßstab entsprechende Absorptionskurve aufweisen. Für das bei der Fertigung der Aufsätze verwendete Absorptionsmaterial konnte kein adäquates Ersatzmaterial gefunden werden. Insbesondere sind derzeit in der BAST auch keine Messmöglichkeiten der Impedanz bei höheren Frequenzen vorhanden. Ein dafür geplanter Mini-Hallraum konnte noch nicht realisiert werden. Um Reflexionen am Hallentisch, auf dem die Wand über die gesamte Diagonale montiert war, zu vermeiden, wurde dieser mit Absorptionsmatten ausgelegt. In Bild 19 ist die Vorderansicht des Aufbaus mit dem Messroboter (links) und dem Referenzmikrofon (rechts) dargestellt.

Bei dem verwendeten Messroboter handelt es sich um ein mit zwei Schrittmotoren ausgestattetes Aluminiumgestell, das es erlaubt ein Mikrofon in zwei zueinander senkrechten Richtungen (hier Entfernung zur Wand und Höhe) exakt zu positionieren. Das Referenzmikrofon wurde verwendet, um während der Messung den Schallpegel der Schallquelle hinter der Wand zu kontrollieren.



Bild 19: Modellwand mit Aufsätzen in der HAMt – Vorderansicht mit Mikrofonen



Bild 20: Modellwand mit Aufsätzen in der HAMt – Rückansicht mit Lautsprecher

In Bild 20 ist der Aufbau von der Rückseite dargestellt. Referenzmikrofon und Messroboter sind hinter der Wand zu erkennen. Im Vordergrund ganz links ist der verwendete Bauakustik-Lautsprecher zu sehen. Dieser wurde in seiner Entfernung zur Wand und in der Höhe je nach Messkonfiguration verstellt.

Die verwendeten Messkonfigurationen richteten sich nach den vom AIT verwendeten geometrischen Anordnungen (CONTER et al., 2015). Allerdings wurden zusätzlich auch Messungen mit den Normpositionen (d. h. mit Erhöhung von Lautsprecher und Mikrofonen) durchgeführt.

### Messdurchführung

Die Messdurchführung erfolgte in der Zeit von Mitte November 2016 (erste Tests) bis Ende Mai 2017. Eine Klimatisierung der HAMt war wegen der Messungen im Maßstab 1:1 nicht notwendig. Die Lufttemperatur betrug durchweg ca. 20 °C.

Zunächst wurden Lautsprecher und Messroboter geometrisch justiert. Mit dem Bauakustiklautspre-

cher wurde mit dem internen Generator dauerhaft weißes Rauschen abgestrahlt. Die verwendeten Mikrofone wurden kalibriert und ihre Signale einem Analysator zugeführt. Dieser Analysator steuerte auch den Messroboter und fuhr alle vorher definierten Messpositionen automatisch an.

### Messergebnisse

Die Auswertung erfolgte in Anlehnung an die ISO 9613-2. Da aber nicht die Raumimpulsantworten mit Signal-Sweeps, sondern die Einfügedämpfung mit weißem Rauschen gemessen wurde, ergeben sich entsprechende Einfügedämpfungsindex-Differenzen:

$$DL_{\Delta DE} = -10 \cdot \lg \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{18} 10^{0,1L_j} 10^{-0,1\Delta DE_j}}{\sum_{j=1}^{18} 10^{0,1L_j}} \right\} \quad (5)$$

In Tabelle 8 bis Tabelle 10 sind die Einfügedämpfungsindex-Differenzen für die Sendepositionen „S1“ bis „S4“ und gemittelt über alle Sendepositionen (S1-S4) jeweils für die Messanordnungen des AIT (2 m und 3 m) sowie nach Norm dargestellt. Die

Terzband in Hz	S1	S2	S3	S4	S1-S4
100	-1,2	9,9	-2,0	2,1	4,0
125	-0,8	1,3	-1,7	0,2	-0,3
160	6,9	-0,3	4,1	0,9	2,5
200	3,3	1,6	7,1	1,7	2,9
250	3,4	2,1	4,2	0,8	2,6
315	5,8	1,3	3,4	2,0	2,9
400	4,2	0,1	-0,4	2,4	1,4
500	3,6	1,0	-1,4	1,0	1,2
630	2,7	2,2	2,0	2,9	2,5
800	3,6	1,4	2,6	3,6	2,8
1.000	4,0	6,6	0,4	2,3	3,5
1.250	4,8	10,0	3,3	5,0	7,2
1.600	5,2	9,5	5,3	7,8	7,6
2.000	9,8	8,5	8,0	9,2	8,9
2.500	14,1	10,9	11,0	11,2	11,4
3.150	13,4	13,7	10,6	12,8	12,9
4.000	15,6	18,3	12,7	14,3	16,1
5.000	15,8	24,2	11,9	15,7	20,4
$DL_{\Delta DE}$	4,6	4,1	2,5	3,7	4,2

Tab. 8: Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DE_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DE}$  für den Lärmschutzwandaufsatz in dB, Messanordnung des AIT (2 m)

Terzband in Hz	S1	S2	S3	S4	S1-S4
100	-1,5	4,3	-2,4	0,0	0,6
125	-1,5	3,2	-4,1	0,2	0,0
160	6,1	0,8	3,3	0,3	2,6
200	2,0	0,5	4,3	0,9	1,6
250	4,1	1,8	2,6	0,8	2,4
315	5,1	1,5	2,4	0,2	2,2
400	4,2	2,2	0,9	1,8	2,1
500	2,7	2,5	-1,1	2,6	1,9
630	2,5	3,5	1,3	1,0	2,3
800	1,9	3,0	2,6	2,0	2,4
1.000	3,3	3,2	1,0	2,4	2,6
1.250	2,2	3,9	1,9	1,9	2,7
1.600	4,6	8,1	4,0	6,1	6,3
2.000	8,1	10,1	6,2	8,1	8,6
2.500	11,5	11,9	9,0	9,2	10,7
3.150	9,5	13,9	8,3	10,7	11,6
4.000	13,3	17,1	8,2	11,3	13,4
5.000	14,7	17,9	8,5	12,3	14,4
$\Delta DE_j$	3,6	4,0	2,2	2,8	3,4

Tab. 9: Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DE_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DE}$  für den Lärmschutzwandaufsatz in dB, Messanordnung des AIT (3 m)

energetische Mittelung über die Sendepositionen (S1-S4) erfolgte dabei schon bei den Einzeldifferenzen der Terzen  $\Delta DE_j$ . Wie in Kapitel 4.1 sei hier darauf hingewiesen, dass die Berechnung der Schallbeugungsindex-Differenzen und die Mittelung über die Mikrofonpositionen dabei nicht kommutativ sind.

Insgesamt ergeben die Messungen bei den nicht normgemäßen Messpositionen des AIT in 2 m Entfernung eine Gesamt-Einfügedämpfung von 4,2 dB bzw. in 3 m 3,4 dB. Der durch den Beugungseffekt charakteristische Anstieg der Einfügedämpfung zu hohen Frequenzen ist deutlich zu erkennen. Bei den normgerechten Messpositionen hingegen ergibt sich eine nicht signifikante (negative) Gesamt-Einfügedämpfung von -0,4 dB.

Die großen Streuungen in den Ergebnissen lassen auf erhebliche Ungenauigkeiten der Messungen schließen. Insgesamt ist die HAMt vor allem im unteren Frequenzbereich bis ca. 400 Hz für derartige Untersuchungen wenig geeignet.

Terzband in Hz	S1	S2	S3	S4	S1-S4
100	0,6	5,9	0,1	0,3	3,4
125	0,4	0,5	-1,0	-0,8	-0,2
160	0,8	-1,3	0,2	0,6	0,1
200	-0,2	-0,8	0,4	0,1	-0,2
250	-0,3	-0,7	0,0	-0,9	-0,4
315	1,8	-0,6	-0,1	-0,2	0,2
400	-0,3	-1,4	-0,1	0,4	-0,4
500	0,3	-1,5	-0,7	0,2	-0,4
630	0,5	-2,2	-0,1	0,0	-0,6
800	0,3	-1,5	-0,5	-0,1	-0,5
1.000	-0,4	-0,4	-0,2	-0,2	-0,3
1.250	-0,1	4,6	0,1	0,1	2,4
1.600	-0,7	-0,8	-0,3	-0,4	-0,6
2.000	-1,1	-4,5	-0,6	-0,6	-2,2
2.500	-1,1	-4,1	-0,6	-0,5	-2,1
3.150	-0,4	-2,9	-0,3	-0,3	-1,6
4.000	-1,2	-0,3	-0,5	-0,6	-0,5
5.000	-0,8	4,2	-0,6	-0,7	2,7
$\Delta DE_j$	-0,2	-1,3	-0,3	-0,2	-0,4

Tab. 10: Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DE_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DE}$  für den Lärmschutzwandaufsatz in dB, normgerecht (2 m)

### 4.3 In-situ-Messungen

Im Rahmen des externen Forschungsvorhabens FE 02.0417/2017/IRB „Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen“ wurden die Lärmschutzwandaufsätze unter realen Bedingungen in situ untersucht. Beim Untersuchungsgebiet handelte es sich um eine Talbrücke in Uttrichshausen (BAB 7, Hessen), auf der eine bestehende Lärmschutzwand mit den Aufsätzen erweitert wurde. Die Baumaßnahme wurde messtechnisch durch die BASt bzw. den Auftragnehmer AED (Acoustic Engineering Dresden) begleitet. Die gesamte Untersuchung ist im entsprechenden Schlussbericht inkl. Kurzbericht zusammengefasst (AED, 2019), der im Folgenden zu großen Teilen zitiert wird.

Vor und nach der Baumaßnahme wurden Emissions- und Immissionsmessungen unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt und die gemessene Pegeldifferenz ausgewiesen. Zeitgleich erfolgte die Erfassung der Verkehrsdaten sowie der Meteorologie, um in der Auswertung mithilfe eines geeigneten Schallausbreitungsmodells eine Korrektur der Immissionspegel bezüglich der jeweils vorliegenden Verkehrssituation und der meteorologischen Bedingungen durchzuführen. Die Erfassung der Daten zur Verkehrssituation erfolgte mit Hilfe eines Geschwindigkeitsmesssystems mit Kamera getrennt nach Fahrspur, Fahrtrichtung und Fahrzeugkategorie.

Die messtechnische Erfassung der Schallemission erfolgte zu beiden Seiten der Brücke im Abstand von 1,2 m oberhalb der geplanten Schirmkrone. Durch zwei Einzelmikrofone wurde der spektrale Emissionsschalldruckpegel  $L_{p,E}$  in östlicher und westlicher Richtung als Funktion der Zeit aufgezeichnet, um den Schalldruckpegel an den Immissionsorten auf die Schallemission der zum Zeitpunkt der Messung auftretenden Verkehrszusammensetzung normieren zu können. Die zeitgleiche Messung der Schallimmission erfolgte ebenso zu beiden Seiten der Brücke auf Fahrbahnniveau. Durch drei Einzelmikrofone wurde der spektrale Immissionschalldruckpegel  $L_{p,I}$  in östlicher und westlicher Richtung an drei Messpunkten (MP) in horizontalem Abstand von ca. 75 m (MP III), 54 m (MP IV) bzw. 282 m (MP V) zum jeweils ersten Fahrstreifen aufgezeichnet.

Eine Übersicht der Ergebnisse des Schalldruckpegels an den Immissionsorten MP III, MP IV und MP V zeigt Tabelle 11. Dabei sind jeweils der Immis-

unkorrigiert	MP III		MP IV		MP V	
	$L_{p,l}$ in dB(A)	$\sigma$ in dB	$L_{p,l}$ in dB(A)	$\sigma$ in dB	$L_{p,l}$ in dB(A)	$\sigma$ in dB
Messtag Nr.						
1	60,7	0,5	60,7	0,4	54,2	0,8
2	60,7	0,7	61,0	0,6	50,5	1,2
3	59,4	0,8	60,0	0,7	51,4	2,5
<b>GESAMT vorher</b>	<b>60,2</b>	<b>0,9</b>	<b>60,6</b>	<b>0,7</b>	<b>51,8</b>	<b>2,3</b>
4	58,2	0,8	59,4	0,4	48,0	0,8
5	57,1	1,1	58,4	1,7	48,7	2,8
6	55,5	0,9	57,5	0,7	52,0	0,9
<b>GESAMT nachher</b>	<b>57,2</b>	<b>1,4</b>	<b>58,6</b>	<b>1,4</b>	<b>49,1</b>	<b>2,5</b>
<b>Verbesserung</b>	<b>3,0</b>		<b>2,0</b>		<b>2,7</b>	

leistungs- und wetter- korrigiert	MP III		MP IV		MP V	
	$L_{p,Lem,met}$ in dB(A)	$\sigma$ in dB	$L_{p,Lem,met}$ in dB(A)	$\sigma$ in dB	$L_{p,Lem,met}$ in dB(A)	$\sigma$ in dB
Messtag Nr.						
1	63,9	1,0	63,2	0,5	59,3	0,0
2	63,9	0,5	63,8	0,6	57,9	1,5
3	62,5	0,6	62,9	0,5	58,7	2,1
<b>GESAMT vorher</b>	<b>63,4</b>	<b>0,9</b>	<b>63,3</b>	<b>0,7</b>	<b>58,3</b>	<b>1,8</b>
4	62,5	0,6	63,5	0,4	58,1	1,0
5	61,7	0,5	62,8	1,0	56,3	0,5
6	60,4	0,7	62,1	0,7	59,0	0,0
<b>GESAMT nachher</b>	<b>61,7</b>	<b>1,0</b>	<b>62,9</b>	<b>0,9</b>	<b>57,8</b>	<b>1,2</b>
<b>Verbesserung</b>	<b>1,7</b>		<b>0,4</b>		<b>0,5</b>	
<b>Verbesserung durch der Wand um 0,5 m (ohne Wetter)</b>	<b>1,6</b>		<b>1,3</b>		<b>1,1</b>	

Tab. 11: Immissionsschalldruckpegel und Standardabweichung an den MP vor und nach Installation der Lärmschutzwandaufsätze sowie akustische Wirksamkeit (Verbesserung); mit (links) bzw. ohne (rechts) Leistungs-, Wetter- und Störgeräuschkorrektur (Quelle: AED, 2019)

sionsschalldruckpegel und dessen Standardabweichung  $\sigma$  für die einzelnen Messtage sowie der Einzahlwert bei Gesamtbetrachtung der Messkampagne vor und nach Installation der Lärmschutzwandaufsätze dargestellt. Die ebenso ausgewiesene Verbesserung entspricht der akustischen Wirksamkeit, d. h. der Einfügedämpfung der Schirmkrone. Die linke Seite der Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse ohne Leistungskorrektur, ohne Wetterkorrektur und ohne zusätzliche Störgeräuschkorrektur. Zum direkten Vergleich sind rechts die Ergebnisse mit Leistungskorrektur, Wetterkorrektur und zusätzlicher Störgeräuschkorrektur enthalten.

Ist ohne jegliche Korrektur noch eine Einfügedämpfung der Aufsätze von 2 bis 3 dB erkennbar, sinkt die akustische Wirksamkeit nach der erforderlichen Berücksichtigung der zu den jeweiligen Messungen vorliegenden Verkehrs- und Wetterbedingungen auf 0,4 bis 1,7 dB. Gleichzeitig sinkt  $\sigma$  des gemessenen Immissionsschalldruckpegels auf ca. 1 dB.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Installation der Aufsätze mit einer Erhöhung der Lärmschutzwand und damit mit einer Erhöhung des Abschirmmaßes verbunden ist. In Tabelle 11 ist daher zusätzlich eine Angabe zur simulierten Verbesserung der akustischen Situation infolge einer Wanderrhöhung um 0,5 m enthalten. Diese Verbesserung nimmt an den berücksichtigten Messorten vergleichbare Werte an wie die Verbesserung durch die Aufsätze. Unter Berücksichtigung von  $\sigma$  des ge-

messenen Immissionsschalldruckpegels ist daher anzunehmen, dass der angestrebte Einfluss der installierten Schirmkrone auf die Schallbeugung um die Oberkante der Lärmschutzwand vernachlässigbar ist.

## 5 Simulation der Schallausbreitung

### 5.1 SYSNOISE

Für die Simulation der Schallausbreitung wurde zunächst das Programm LMS SYSNOISE Rev. 5.6 verwendet. Es ist zur Analyse von Problemen der Akustik, Vibro-Akustik und Aero-Akustik geeignet. Das Programm beherrscht die Finite Element Method (FEM), Boundary Element Method (BEM) und indirect Boundary Element Method (iBEM) (LMS International, 2003). Für diese Untersuchung wurden die Simulationen nach der iBEM durchgeführt.

Verschiedene Gründe führten dazu, später das Programm ANSYS zu verwenden, das mit der FEM arbeitet: bei den Berechnungen in SYSNOISE war die Größe des Rechengbietes stark beschränkt und die Rechenzeiten sehr hoch. Dieses war vor allem durch die Lizenzbeschränkung auf einen Rechenkern bedingt. Eine Programmerweiterung war nicht möglich, da das Programm softwaretechnisch nicht mehr gewartet wurde und nur noch auf einer alten

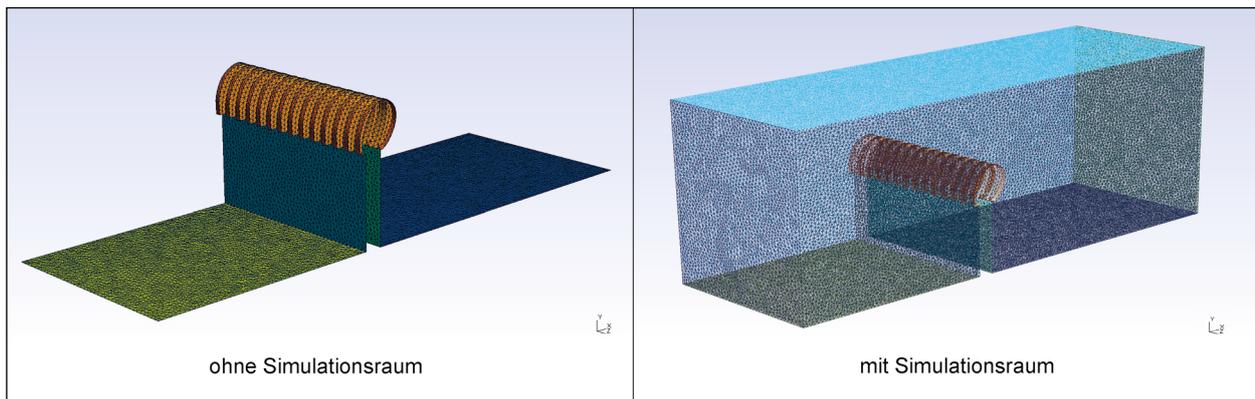


Bild 21: 3D-Darstellung der Modellvariante I bzw. III (siehe Bild 22) der Lärmschutzwand mit Aufsatz für die Berechnungen in SYSNOISE

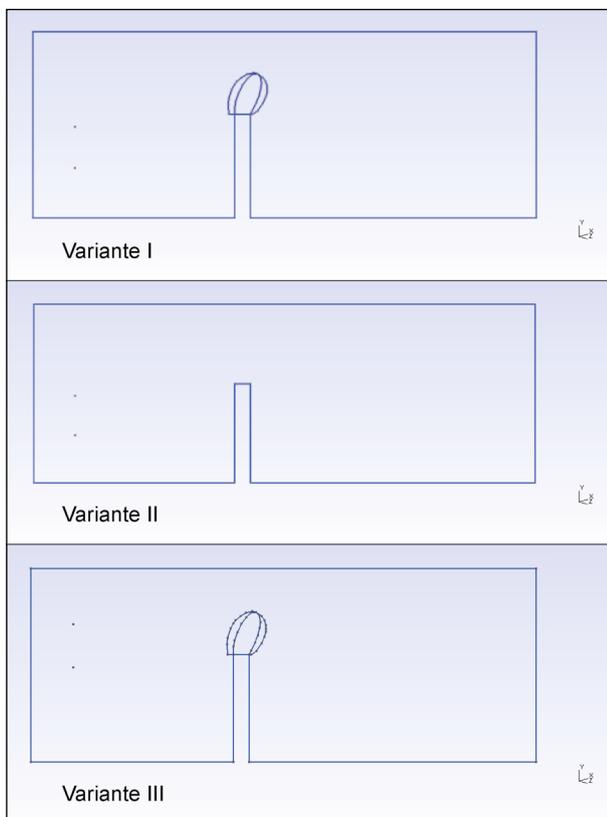


Bild 22: Varianten der iBEM-Modelle für die Berechnungen in SYSNOISE

LINUX-Distribution lief. Zunächst wurde das geometrische Modell mit Gmsh (GEUZAINÉ et al.) erstellt. Das Modell bildet die Krone der Lärmschutzwand mit dem Aufsatz (in der neueren Variante mit einer mittleren Aufsatzhöhe von 49 cm) exakt ab (siehe Bild 21).

In der Simulation wurden drei Modellvarianten betrachtet (siehe auch Bild 22):

- I. Lärmschutzwand mit ideal reflektierender Oberfläche mit Aufsatz. Die Oberfläche des

Aufsatzes ist mit den im KUNDT'schen Rohr ermittelten Material-Impedanzen belegt worden (siehe Kapitel 3). Die Quellpositionen sind so gewählt, dass sie der Positionierung aus dem Adrienne-Verfahren, bezogen auf die Oberkante der Lärmschutzwand ohne Aufsatz, entsprechen. Dies entspricht der (nicht normgerechten) Messung von AIT (siehe Kapitel 2.3).

- II. Lärmschutzwand mit ideal reflektierender Oberfläche ohne Aufsatz. Die Adrienne-Quellpositionen sind bezogen auf die Oberkante der Lärmschutzwand. Diese Variante entspricht der Norm (DIN EN 1793-4, 2015) und dient als Referenz.

- III. Lärmschutzwand mit ideal reflektierender Oberfläche mit Aufsatz. Die Oberfläche des Aufsatzes ist mit den im KUNDT'schen Rohr ermittelten Material-Impedanzen belegt worden (siehe Kapitel 3). Die Adrienne-Quellpositionen sind bezogen auf die Oberkante des Lärmschutzwand-Aufsatzes. Diese Variante entspricht der Norm (DIN EN 1793-4, 2015).

Der Simulationsraum, der das Modell der Lärmschutzwand inkl. Aufsatz umgibt, entspricht einer Größe von 6,0 m x 2,5 m x 2,0 m. Die Simulationen erfolgen im Frequenzbereich von  $f = 500$  Hz bis 1.100 Hz mit einem Frequenzabstand von  $\Delta f = 50$  Hz. Aus der minimalen Wellenlänge von  $\lambda_{1.100\text{Hz}} = 0,31$  m folgt die für die Simulation minimal benötigte Größe der Elemente des Berechnungsgitters (Mesh-Element-Größe)  $MSE < \sim \frac{1}{6} \lambda_{1.100\text{Hz}} \rightarrow MSE = 0,05$  m. Die Empfehlung, dass die Meshgröße ungefähr einem Sechstel der Wellenlänge entsprechen sollte, ist aus (HOWARD et al., 2015) entnommen (Seiten 87ff.).

Als Bezugsebene für die horizontale Position der Schallquelle wurde entsprechend (DIN EN 1793-4, 2015) die Mitte der LSW gewählt. Für die vertikale Position der Schallquelle wurden die in den Modellvarianten I – III genannten Bezugsebenen gewählt.

Zur Abschätzung des Fehlers der Simulation bezüglich der eingegebenen Werten für die Admittanz ist eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt worden. Dabei wurden für Modell I bei 1.000 Hz folgende Fälle simuliert: Mittelwert, Mittelwert  $\pm 0,5 \sigma$ ,  $\pm 1,0 \sigma$ ,  $\pm 1,5 \sigma$ ,  $\pm 2,0 \sigma$ , Minimal- und Maximalwert. Die Auswertung dieser Simulation zeigte, dass die maximalen Unterschiede bei  $\pm 2,0 \sigma$  im Bereich von (*Mittelwert* -0,55) dB bis (*Mittelwert* +0,59) dB liegen. Mit diesem Ergebnis ist es gerechtfertigt, die Messwerte des kleinen Kundt'schen Rohres für die Simulation auch für Frequenzen bis  $f = 6.400$  Hz zu verwenden.

## Ergebnisse

Mit den Ergebnissen der Simulationen der drei Varianten I bis III bei den 13 Frequenzen von 500 Hz bis 1.100 Hz wurden zunächst energetische Mittelungen in kleinen Würfeln (Kantenlänge 0,125 m) durchgeführt. Dadurch wurde eine gewisse örtliche Glättung des Schalldruckpegels erreicht. Die vom Adrienne-Verfahren vorgesehenen Mikrofonpositionen liegen jeweils im Mittelpunkt eines solchen Würfels. In Bild 23 ist der örtlich gemittelte Schalldruckpegel im Bereich hinter der Lärmschutzwand für die Variante I dargestellt.

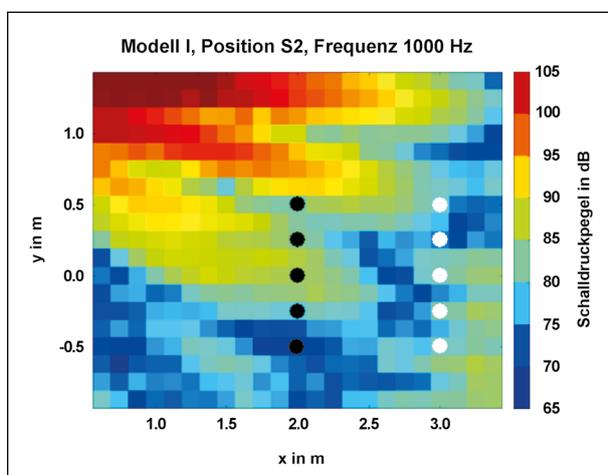


Bild 23: Örtlich gemittelter Schalldruckpegel im Bereich hinter der Lärmschutzwand für die Variante I: Position der Schallquelle gemäß Adrienne-Verfahren ist S2, die Frequenz beträgt 1.000 Hz.

Die x-Achse gibt die senkrechte Entfernung von der Mitte der Lärmschutzwand an. Der Bereich reicht von 0,5 m bis 3,5 m. Die y-Achse gibt die Höhe in Bezug auf die Oberkante der Lärmschutzwand ohne Aufsatz an. Der Bereich reicht hier von -1,0 m bis +1,5 m. Als schwarze Punkte in einer Entfernung von 2,0 m sind die normgerechten Mikrofonpositionen des Adrienne-Verfahrens eingezeichnet (bezogen auf die Oberkante der Lärmschutzwand ohne Aufsatz). Als weiße Punkte sind die zusätzlichen Mikrofonpositionen aus der AIT-Untersuchung in 3,0 m Entfernung eingezeichnet. Die Position der Schallquelle nach dem Adrienne-Verfahren ist hier S2, d. h. 0,15 m unterhalb der Oberkante der Lärmschutzwand bei  $x = -2,0$  m. Die Frequenz beträgt in diesem Beispiel 1.000 Hz. Weitere Bilder für die anderen Varianten und Frequenzen sind im Anhang 2 zu finden.

In einem weiteren Schritt wurden für die Terzen mit den Mittenfrequenzen 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz und 1.000 Hz frequenzgemittelte Pegel bestimmt. Dazu wurden, je nach betrachteter Terz, jeweils 2, 3, 3 bzw. 5 Pegel bei Einzelfrequenzen im Frequenzbereich der jeweiligen Terz energetisch gemittelt. Dadurch wurde eine gewisse spektrale Glättung des Schalldruckpegels erreicht.

In Bild 24 ist der frequenzgemittelte Schalldruckpegel im Bereich hinter der Lärmschutzwand für die Variante I dargestellt. Auch hier befindet sich die Position der Schallquelle nach dem Adrienne-Verfahren bei S2, d. h. 0,15 m unterhalb der Oberkante der Lärmschutzwand bei  $x = -2,0$  m. Die Terz-Mittenfrequenz beträgt in diesem Beispiel 1.000 Hz.

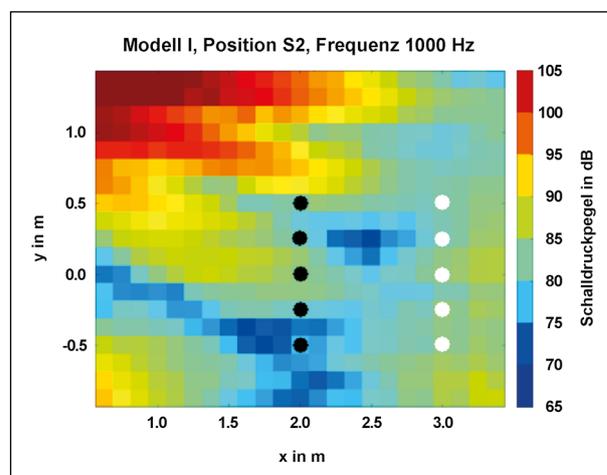


Bild 24: Frequenzgemittelter Schalldruckpegel im Bereich hinter der Lärmschutzwand für die Variante I: Position der Schallquelle nach dem Adrienne-Verfahren ist S2, die Terz-Mittenfrequenz beträgt 1.000 Hz.

Weitere Bilder für die anderen Varianten und Mittenfrequenzen sind im Anhang 2 aufgeführt.

Zur weiteren Auswertung und Vergleich mit den Ergebnissen der AIT-Messungen als auch mit den Berechnungen nach ISO 9613-2 wurden Mittelwerte an jeweils 5 Mikrofonpositionen für die Terzen mit den Mittenfrequenzen 500, 630, 800 und 1.000 Hz berechnet. In Tabelle 12 sind die Messergebnisse von AIT im Bereich von 500 Hz bis 1.000 Hz (aus Tabelle 3) den entsprechenden in SYSNOISE simulierten Einfügedämpfungen gegenübergestellt, die aus der Differenz zwischen Variante II und I folgen. Die Abweichungen zwischen Messung und Simulation sind teilweise erheblich und uneinheitlich.

In Tabelle 13 sind die Berechnungsergebnisse nach ISO 9613-2 an den AIT-Messpositionen im Bereich von 500 Hz bis 1.000 Hz (siehe Tabelle 3) den entsprechenden Simulationsergebnissen, d. h. den Differenzen von Variante II und I, gegenübergestellt.

Auch hier sind die Differenzen uneinheitlich. Für 3 m Entfernung weichen aber alle Differenzen um nicht mehr als 2 dB ab, d. h. die Einfügedämpfungen lassen sich zu einem großen Teil durch die Beugung nach ISO 9613-2 erklären. In dieser Messgeometrie hat offensichtlich die Beugung gegenüber der Absorption einen größeren Einfluss auf das Ergebnis. Und dieser Einfluss ist in einer Entfernung von 3 m größer als in 2 m.

In Tabelle 14 sind die Berechnungsergebnisse nach ISO 9613-2 an normgerechten Messpositionen im Bereich von 500 Hz bis 1.000 Hz den entsprechenden Simulationsergebnissen, d. h. den Differenzen von Variante II und III, gegenübergestellt.

Hier sind die Abweichungen zwischen Berechnung nach ISO und der Simulation groß, sowohl für 2 m als auch für 3 m Entfernung. Verglichen mit den Berechnungen an den AIT-Messpositionen hat in dieser Messgeometrie offensichtlich die Absorption gegenüber der Beugung einen größeren Einfluss auf

Terzband in Hz	Entfernung 2 m			Entfernung 3 m		
	AIT	Simul.	AIT-Simul.	AIT	Simul.	AIT-Simul.
500	4,9	6,6	-1,7	4,5	5,3	-0,8
630	6,1	3,1	3,0	5,1	4,7	0,4
800	7,0	6,4	0,6	6,3	2,8	5,3
1.000	7,3	14,3	-7,0	6,4	3,4	3,0

Tab. 12: Schallbeugungsindex-Differenzen bzw. Einfügedämpfungen für den Lärmschutzwandaufsatz in dB – Vergleich der AIT-Messungen und SYSNOISE-Simulationen

Terzband in Hz	Entfernung 2 m			Entfernung 3 m		
	ISO	Simul.	ISO-Simul.	ISO	Simul.	ISO-Simul.
500	3,5	6,6	-3,1	3,4	5,3	-1,9
630	4,0	3,1	0,9	3,8	4,7	-0,9
800	4,5	6,4	-1,9	4,3	2,8	1,5
1.000	4,9	14,3	-9,4	4,7	3,4	1,3

Tab. 13: Schallbeugungsindex-Differenzen bzw. Einfügedämpfungen für den Lärmschutzwandaufsatz in dB – Vergleich der ISO- und SYSNOISE-Berechnungen an den AIT-Messpositionen.

Terzband in Hz	Entfernung 2 m			Entfernung 3 m		
	ISO	Simul.	ISO-Simul.	ISO	Simul.	ISO-Simul.
500	2,6	0,7	1,9	2,1	-3,3	5,4
630	4,1	2,5	1,6	3,2	2,5	0,7
800	5,0	0,3	4,7	4,9	0,7	4,2
1.000	5,6	-0,4	6,0	4,9	-1,7	6,6

Tab. 14: Schallbeugungsindex-Differenzen bzw. Einfügedämpfungen für den Lärmschutzwandaufsatz in dB – normgerechter Vergleich der ISO-Berechnungen und SYSNOISE-Simulationen

das Ergebnis. Das deckt sich mit der Erkenntnis aus Kapitel 2.3.

Die z. T. erheblichen Abweichungen und Streuungen resultieren zum einen aus einem zu klein gewählten Modell. Darüber hinaus wurden nur relativ wenige Frequenzen untersucht und der verwendete Frequenzraum war eng begrenzt. Ebenso konnte bisher nur eine Quellposition verwendet werden und nur die senkrechte Lautsprecher-Mikrofon-Geometrie untersucht werden. All dies resultiert aus den Einschränkungen bei der Verwendung des Simulationsprogramms SYSNOISE. So dauert eine Berechnung im verwendeten kleinen Berechnungsvolumen von  $30 \text{ m}^3$  bei einer Diskretisierung von  $5 \text{ cm}$  (das entspricht ca. einer halben Million Elemente) etwa  $4,5 \text{ h}$ .

## 5.2 ANSYS

Das Programm ANSYS ist eine etablierte FEM-Software aus dem Hause Ansys Inc. Die ersten Versionen der Software wurden in den 1970er-Jahren entwickelt. Mit ANSYS lassen sich lineare und nicht-lineare Probleme aus den Bereichen Strukturmechanik, Fluidmechanik, Akustik, Thermodynamik, Piezoelektrizität, Elektromagnetismus sowie kombinierte multiphysikalische Aufgabenstellungen lösen. Hier kam ANSYS 19.0 zur Anwendung.

Nach einigen Testläufen auf Arbeitsplatzrechnern wurde im Winter 2016/2017 ein leistungsstarker ANSYS-Server beschafft, der mit 36 Prozessorkernen und ausreichend Arbeitsspeicher ausgestattet ist, um die aufwendigen und zeitintensiven FEM-Simulationen durchführen zu können. Aufgrund der Komplexität des Problems, nahm die Realisierung und Optimierung der technischen Rahmenbedingungen, der Modelle und der Rechnungen unerwartet viel Zeit in Anspruch. So mussten beispielsweise erweiterte Windows-Lizenzen beschafft werden, um die Berechnungen parallel auf mehreren Prozessorkernen verarbeiten zu können, und immer wieder kam es zu Inkonsistenzen in den Berechnungsergebnissen, die entsprechende Anpassungen im „Acoustic Package“ der Software erforderten.

### Geometrisches Modell und Varianten

Die prinzipielle Geometrie des FEM-Modells ist in Bild 25 gezeigt. Dem Raumvolumen sind die Eigenschaften von Luft zugewiesen (Dichte =  $1,2041 \text{ kg/m}^3$  und Schallgeschwindigkeit =  $343,24 \text{ m/s}$ ). Die

Lärmschutzwand ohne Aufsätze hat eine Höhe von  $4 \text{ m}$  und eine Dicke von  $0,2142 \text{ m}$ . Der Raum ist von einer sogenannten PML (Perfectly Matched Layer) umgeben. Auf dem äußeren Rand der PML wird der Schalldruck auf  $0$  gesetzt, um vollständig absorbierende, nicht-reflektierende Randbedingungen zu erhalten. Die PML-Dicke ist mit  $\geq 8$  Gitterelemente ausreichend groß, um unphysikalische Randeefekte zu vermeiden.

Die Ausdehnung der Bereiche vor und hinter der Lärmschutzwand sowie die Höhe des Berechnungsvolumens sind der Frequenz bzw. der Wellenlänge entsprechend groß zu wählen, um sicherzustellen, dass keine unerwünschten Wechselwirkungen zwischen dem Rand des Berechnungsvolumens und Objekten innerhalb auftreten. Letzterer Abstand sollte mindestens  $\lambda/3$  betragen.

Die Quellemission wird auf der Kante eines (Hilfs-)Quaders innerhalb des Raumvolumens  $2 \text{ m}$  vor der Lärmschutzwand definiert. Die Kante befindet sich  $0,5 \text{ m}$  (S1) bzw.  $0,15 \text{ m}$  (S2) unterhalb der Oberkante der Wand bzw. des Aufsatzes. Alle vier möglichen Quellhöhen sind in Bild 25 als rot markierte Kanten hervorgehoben.

Die Entwicklung des geometrischen Modells hat mehrere Iterationen durchlaufen. Ursprünglich wurde ein vollständig 3-dimensionales Modell angestrebt, das sich jedoch aus unterschiedlichen Gründen als nicht zielführend herausstellte (siehe Kapitel 6). Das nun verwendete Modell ist  $2\frac{1}{2}$ -dimensional.

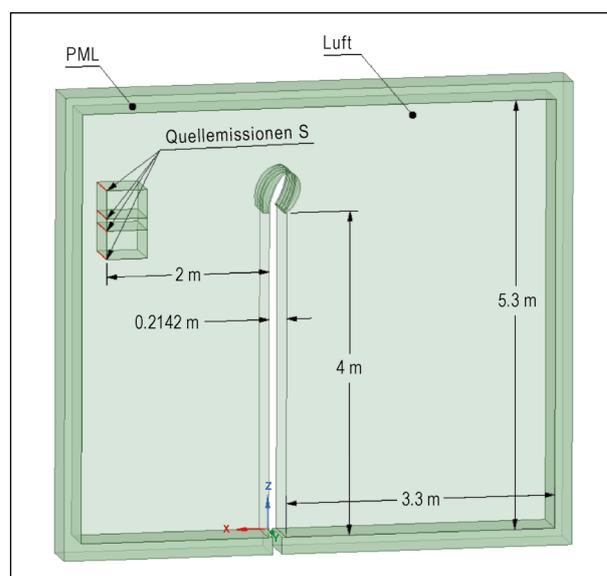


Bild 25: Prinzipielles geometrisches Modell für die FEM-Simulationen in ANSYS; hier gezeigt wie für den Frequenzbereich  $1.168 \text{ Hz} - 2.178 \text{ Hz}$  verwendet.

nal, d. h. in z- und x-Richtung (vor/hinter und über/unter der Wand) werden alle ankommenden Schallwellen durch die PML absorbiert und es wird eine Ausbreitung im Freien ohne Reflexionen simuliert. In y-Richtung ohne PML greift die Symmetriebedingung: Die Linienquellen und die Wand inkl. der Aufsätze sind also virtuell „unendlich“ lang.

Ähnlich wie in den Simulationen mit SYSNOISE (siehe Kapitel 5.1) wurden auch mit ANSYS verschiedene Modell-Varianten berechnet, die dann miteinander verglichen werden können (siehe auch Bild 26):

- I. Lärmschutzwand ohne Aufsatz. Die Wand wird als schallhart modelliert und die Positionen der Schallquellen sowie der Mikrofone entsprechen den Vorgaben des in der (DIN EN 1793-4, 2015) beschriebenen Adrienne-Verfahrens.
- II. Lärmschutzwand mit schallhartem Aufsatz. Der Aufsatz wird als Erhöhung der Wand aus demselben Material modelliert. Die Positionen der Schallquellen sowie der Mikrofone werden um 50 cm (Höhe des Aufsatzes) nach oben verschoben, sodass die Anordnung weiterhin

normgerecht bezogen auf die Oberkante des Aufsatzes ist.

- III. Lärmschutzwand mit Impedanz-belegtem Aufsatz, normgerechte Anordnung. Entspricht der Variante II, jedoch ist nun die Oberfläche des Aufsatzes mit der im KUNDT'schen Rohr ermittelten Material-Impedanz belegt worden (siehe Kapitel 3).
- IV. Lärmschutzwand mit Impedanz-belegtem Aufsatz, Anordnung wie in AIT-Studie (siehe Kapitel 2.3). Entspricht der Variante III, jedoch beziehen sich die Positionen der Schallquellen sowie der Mikrofone (trotz der Erhöhung durch den Aufsatz) auf die Oberkante der Lärmschutzwand (nicht-normgerecht).

Liegen die Ergebnisse der FEM-Simulationen für diese vier Varianten vor, lassen sich daraus über Vergleich und Differenzbildung verschiedene Fragestellungen beantworten:

- V1) Normgerechte Bestimmung der Einfügedämpfung des Aufsatzes auf der Lärmschutzwand: Variante III – Variante I

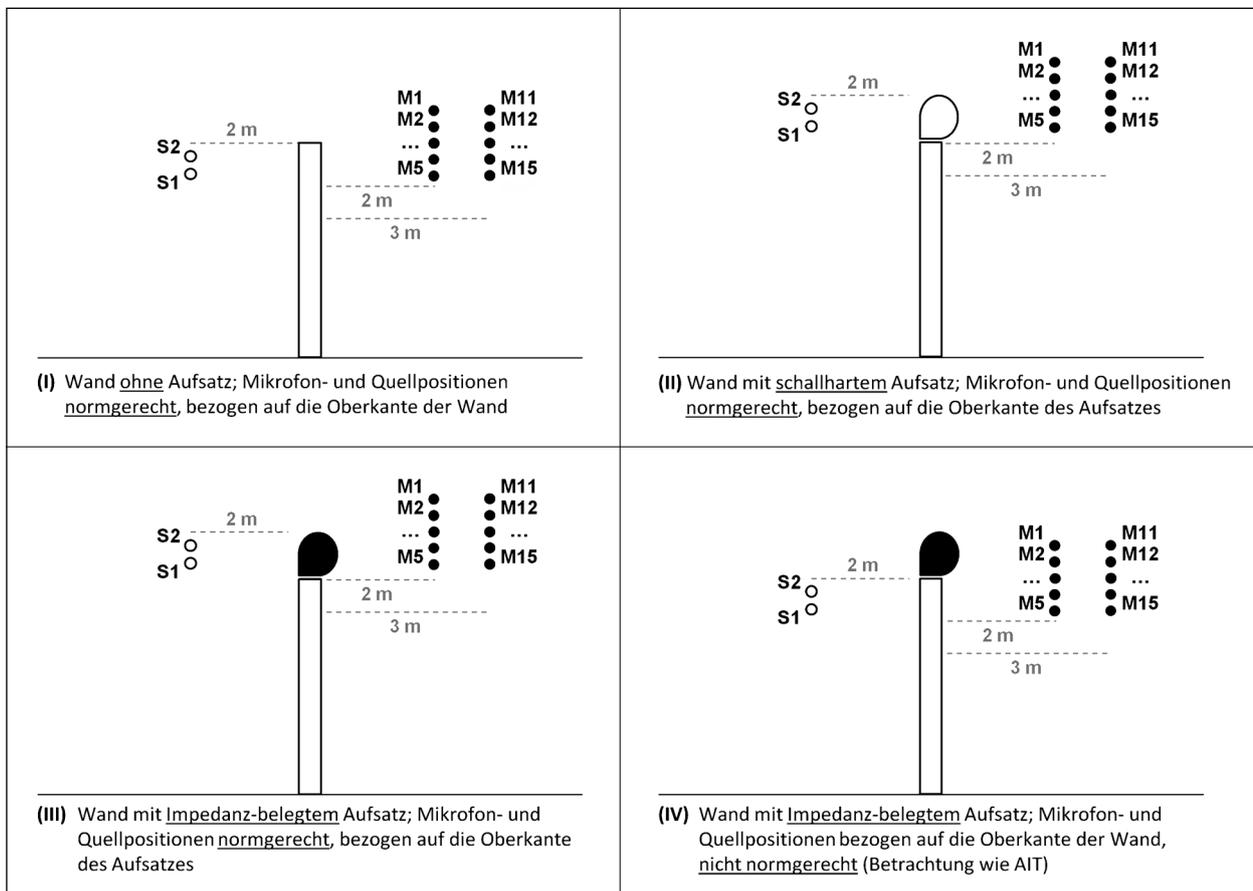


Bild 26: Darstellung und Beschreibung der in ANSYS berechneten Modell-Varianten

- V2) Nicht-normgerechte Bestimmung der Einfügedämpfung, analog zum Vorgehen in der AIT-Studie: Variante IV – Variante I
- V3) Anteil der Einfügedämpfung, der durch die Belegung des Aufsatzes mit der Material-Impedanz entsteht: Variante III – Variante II
- V4) Akustische Wirksamkeit des Aufsatzes ohne Impedanz, d. h. Effekt, der durch die Form des Aufsatzes allein bewirkt wird: Variante II – Variante I

### Parameter der FEM-Berechnung

Die FEM-Rechnungen wurden mittels harmonischer Analyse (Modul Harmonic Acoustics in ANSYS 19.0) durchgeführt. Um zuverlässige Ergebnisse für die Terzbänder von 100 Hz bis 2.000 Hz zu erhalten, wurden 49 Einzelfrequenzen berechnet. Die zu berechnende Anzahl an Einzelfrequenzen für die jeweiligen Terzbänder wurde gemäß (JUNKER et al., 2015) so gewählt, dass der Fehler im 95%-Konfidenzintervall maximal 1 dB beträgt. Zur Optimierung der Rechenzeiten wurden die Frequenzbereiche 100 Hz – 1.080 Hz sowie 1.168 Hz – 2.178 Hz separat betrachtet. So können das geometrische Modell und das Berechnungsgitter (Mesh) an die entsprechenden Wellenlängenbereiche angepasst werden. Wie in Kapitel 5.1 bereits beschrieben, ergibt sich aus der minimalen Wellenlänge die Mesh-Element-Größe ( $MSE < \sim \frac{1}{6} \lambda$ ). Sie beträgt 0,053 m für den Frequenzbereich bis 1.080 Hz und 0,0263 m für den Frequenzbereich bis 2.178 Hz. Im letzteren Fall besteht das Berechnungsvolumen inkl. PML aus über 8,5 Mio. Gitterelementen.

Jede Variante (siehe oben) wurde für jede Einzelfrequenz zwei Mal, mit S1 bzw. S2 als Emission, berechnet. Als Quelle wurde eine „Mass Source“ mit einer Amplitude von  $2,522 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$  verwendet. Da in der Auswertung nur relative Betrachtungen angestellt und Pegeldifferenzen betrachtet werden, ist der Absolutwert der Emission allerdings ohne Relevanz solange dieser für alle Rechnungen gleich gewählt wird.

Für jedes Mesh-Element werden der Schalldruck (in Pa) und der Schalldruckpegel (in dB) ausgegeben. Der Schalldruckpegel an den Mikrofonpositionen M1 bis M5 und M11 bis M15 wurden jeweils als Mittelung über ein kleines Raumvolumen an der entsprechenden Position bestimmt.

### Ergebnisse

Das Berechnungsergebnis des Schalldruckpegels für das gesamte Berechnungsvolumen ist in Bild 27 bzw. Bild 28 beispielhaft für eine Simulation ohne bzw. mit Lärmschutzwandaufsatz als Konturplot dargestellt. Die Frequenz beträgt 1.360 Hz und die Höhe der Emissionsquelle ist jeweils 50 cm unterhalb der Oberkante der Lärmschutzwand bzw. des Aufsatzes. Gezeigt ist ein Querschnitt entlang der x-z-Ebene durch die Mitte des Berechnungsvolumens.

Im Bereich vor der Wand erkennt man sehr deutlich die Entstehung von lokalen Minima und Maxima aufgrund der Interferenzen zwischen einlaufenden

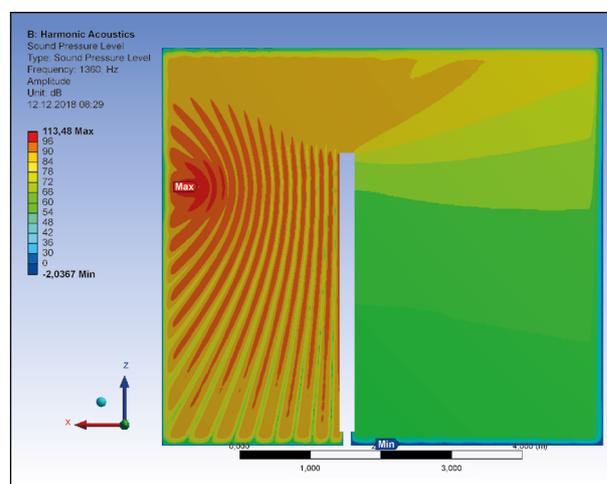


Bild 27: FEM-Berechnung des Schalldruckpegels bei 1.360 Hz für Variante I (Lärmschutzwand ohne Aufsatz); die Emissionsquelle S1 befindet sich 50 cm unterhalb der Wandoberkante im Abstand von 2 m.

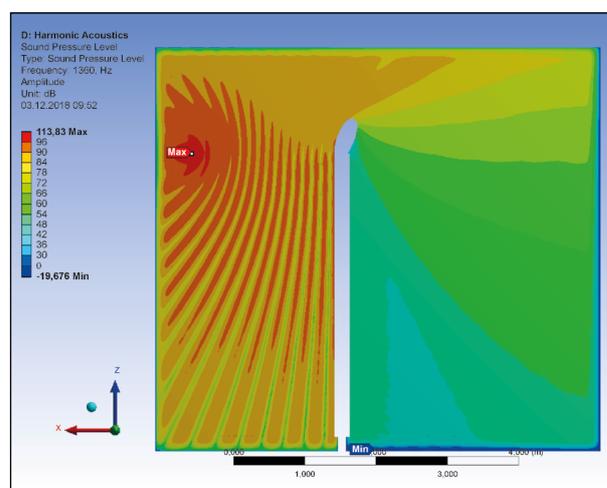


Bild 28: FEM-Berechnung des Schalldruckpegels bei 1.360 Hz für Variante III (Lärmschutzwand mit Impedanz-belegtem Aufsatz); die Emissionsquelle S1 befindet sich 50 cm unterhalb der Aufsatzoberkante im Abstand von 2 m.

und an der Wand reflektierten Schallanteilen. Außerdem gut erkennbar ist die Ausbildung des Schallshadowbereiches hinter der Lärmschutzwand bzw. die unterschiedliche Ausprägung dieses Bereiches im Fall mit Lärmschutzwandaufsatz. Weitere Konturplots für die anderen Varianten und Frequenzen können im Anhang 3 – Berechnungsergebnisse ANSYS betrachtet werden.

Aus den Schalldruckpegeln M1 bis M5 und M11 bis M15 für die Modell-Varianten I bis IV wurden die Differenzen für die Vergleiche V1 bis V4 (siehe oben) gebildet. Die resultierenden Einfügedämpfungen sind in Bild 29 bis Bild 32 sowie in Tabelle 15 bis Tabelle 18 zusammengefasst. Die Werte sind jeweils über M1 bis M5 (Entfernung zur Wand = 2 m) bzw. M11 bis M15 (Entfernung zur Wand = 3 m) gemittelt. In den jeweils letzten Zeilen der Tabellen finden sich zudem die Mittelungen über alle betrachteten Terzbänder zwischen 100 Hz und 2.000 Hz.

Die normgerechte Betrachtung (Bild 29 und Tabelle 15) liefert für fast alle Terzen nur geringe Einfügedämpfungen von  $\leq 1$  dB. Für 100 Hz ergibt sich aus den FEM-Simulationen sogar eine leichte Erhöhung des Pegels nach Installation des Aufsatzes (negative Einfügedämpfung). Es ist kein eindeutiger frequenzabhängiger Trend erkennbar. Die frequenzgemittelte Pegelminderung beträgt ca. 0,5 dB in 2 m und ca. 0,3 dB in 3 m Entfernung. Innerhalb der Fehlertoleranz von 1 dB ist dies allerdings als nicht signifikant zu werten, sodass in diesem Vergleich von einer vernachlässigbaren akustischen Wirksamkeit der Lärmschutzwandaufsätze auszugehen ist.

Anders als im normgerechten Vergleich, werden in der vergleichenden Betrachtung V2 (nicht-normgerecht, aber analog zur AIT-Studie) die Höhen der Quellen und Mikrofone nicht an die Erhöhung durch die Aufsätze angepasst. So lässt sich die akustische Wirksamkeit der Aufsätze inkl. des Pegelminderungseffektes durch die Erhöhung abbilden (Bild 30 und Tabelle 16). Erwartungsgemäß erhält man hier deutlich höhere und signifikante Einfügedämpfungen von ca. 3 dB bei niedrigen Frequenzen bis zu über 12 dB bei hohen Frequenzen. Dabei nimmt die Dämpfung mit steigender Frequenz kontinuierlich zu, mit Ausnahme eines lokalen Minimums bei etwa 1.000 Hz. Im Mittel liegt die Einfügedämpfung zwischen 6 dB und 7 dB.

Die Frage nach der Wirkung der Material-Impedanz wird mit dem Vergleich von Variante III und Variante

II beantwortet (Bild 31 und Tabelle 17). Hier ergeben sich ab 200 Hz signifikante Einfügedämpfungen über 1 dB bis knapp unter 3 dB bei 2.000 Hz für die Emissionsquelle S1. Wie im Falle von V2, nimmt die Pegelminderung mit zunehmender Frequenz zu, abgesehen von einem schwachen Einbruch bei etwa 1.000 Hz. Im Mittel zeigt sich, dass die Belegung des Aufsatzes mit der Material-Impedanz (im Vergleich mit einem schallharten Aufsatz) zu einem signifikanten Effekt zwischen 1 dB und 2 dB führt.

Schließlich wird die FEM-Simulation der Wand ohne Aufsatz mit der Variante mit schallhartem Aufsatz

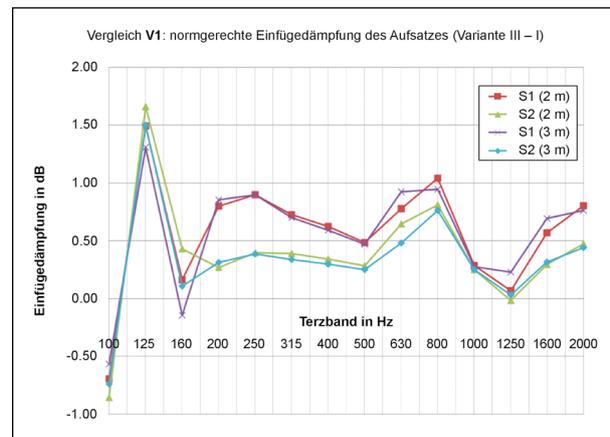


Bild 29: Ergebnisse des Vergleichs V1 (Variante III – I)

Terzband in Hz	Entfernung 2 m		Entfernung 3 m	
	S1	S2	S1	S2
100	-0,69	-0,86	-0,57	-0,74
125	1,49	1,66	1,31	1,50
160	0,16	0,43	-0,14	0,11
200	0,80	0,27	0,86	0,31
250	0,90	0,40	0,90	0,39
315	0,73	0,39	0,70	0,34
400	0,62	0,34	0,59	0,30
500	0,49	0,28	0,47	0,25
630	0,78	0,65	0,92	0,48
800	1,04	0,81	0,95	0,76
1.000	0,29	0,25	0,28	0,25
1.250	0,07	-0,02	0,23	0,03
1.600	0,57	0,30	0,69	0,32
2.000	0,80	0,47	0,76	0,44
Mittel	0,55	0,35	0,54	0,31

Tab. 15: Vergleich V1 – normgerechte Einfügedämpfung des Aufsatzes (Variante III – I), Werte in dB

verglichen (Bild 32 und Tabelle 18). So kann nachvollzogen werden, welche Wirkung die Form des Aufsatzes auf die Schallbeugung über die Wand hat. Mit Ausnahme der Terz bei 125 Hz zeigen alle Terzbänder eine negative Einfügedämpfung, d. h. laut FEM-Modellierung führt die Form des Aufsatzes zu einer Pegelerhöhung im Vergleich zum normalen Wandabschluss. Diese Pegelerhöhung ist zwar sehr gering (zwischen 1 dB und 2 dB, im Mittel etwa 1 dB), jedoch nicht vernachlässigbar. Eine deutliche Frequenzabhängigkeit ist nur zwischen 200 Hz und 500 Hz erkennbar.

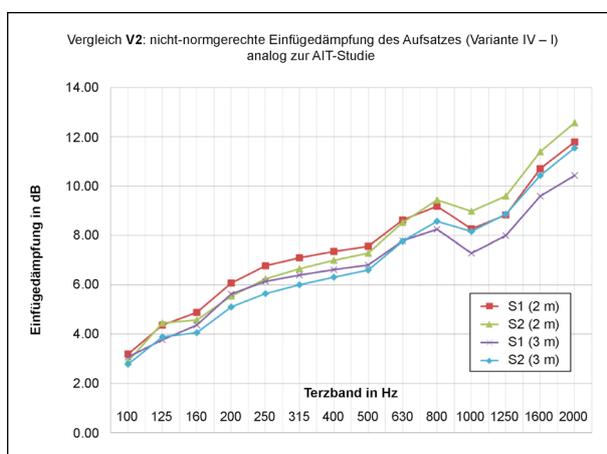


Bild 30: Ergebnisse des Vergleichs V2 (Variante IV – I)

Terzband in Hz	Entfernung 2 m		Entfernung 3 m	
	S1	S2	S1	S2
100	3,19	2,90	3,07	2,78
125	4,37	4,46	3,77	3,89
160	4,88	4,57	4,36	4,07
200	6,07	5,54	5,63	5,10
250	6,77	6,25	6,15	5,65
315	7,10	6,65	6,40	6,00
400	7,36	7,01	6,62	6,32
500	7,57	7,29	6,82	6,61
630	8,62	8,52	7,78	7,77
800	9,19	9,45	8,25	8,57
1.000	8,25	8,99	7,28	8,17
1.250	8,82	9,60	7,98	8,86
1.600	10,71	11,39	9,59	10,43
2.000	11,78	12,57	10,43	11,54
Mittel	6,88	6,75	6,26	6,20

Tab. 16: Vergleich V2 – nicht-normgerechte Einfügedämpfung des Aufsatzes analog zur AIT-Studie (Variante IV – I), Werte in dB

Die vergleichenden Betrachtungen V1, V3 und V4 weisen eine bemerkenswerte Konsistenz auf: Während die Ergebnisse im Falle von V3 eine signifikante akustische Wirksamkeit des Aufsatzmaterials suggerieren, findet sich diese nur stark gemindert und nicht mehr signifikant in der normgerechten Berechnung V1 wieder. In anderen Worten, der positive akustische Effekt, der durch das Absorptionsmaterial hervorgerufen wird, ist im Vergleich mit der Lärmschutzwand ohne Aufsatz verloren gegangen bzw. nur noch im reduzierten Maße vorhanden. Die Erklärung findet sich, wenn man die Einfügedämpf-

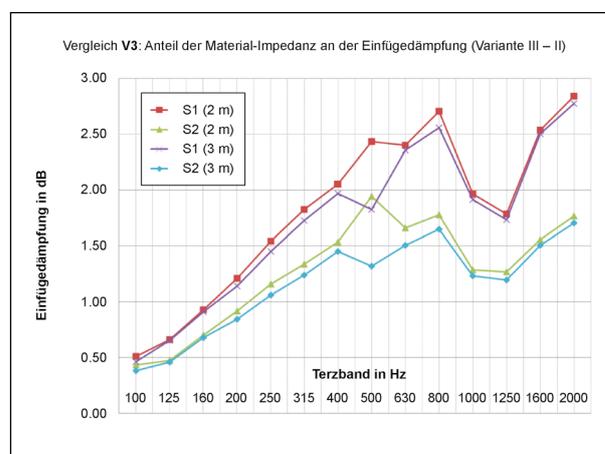


Bild 31: Ergebnisse des Vergleichs V3 (Variante III – II)

Terzband in Hz	Entfernung 2 m		Entfernung 3 m	
	S1	S2	S1	S2
100	0,51	0,43	0,46	0,38
125	0,66	0,47	0,65	0,46
160	0,93	0,70	0,91	0,68
200	1,21	0,92	1,14	0,84
250	1,54	1,16	1,45	1,06
315	1,83	1,34	1,73	1,24
400	2,05	1,54	1,97	1,45
500	2,44	1,94	-1,82	1,32
630	2,40	1,66	2,36	1,51
800	2,71	1,78	2,56	1,65
1.000	1,96	1,29	1,91	1,23
1.250	1,79	1,27	1,73	1,19
1.600	2,54	1,56	2,50	1,51
2.000	2,84	1,77	2,77	1,70
Mittel	1,75	1,25	1,66	1,14

Tab. 17: Vergleich V3 – Anteil der Einfügedämpfung, der durch die Material-Impedanz entsteht (Variante III – II), Werte in dB

fungen aus V4 heranzieht. Die negativen Werte, die sich hier ergeben, entsprechen gerade dieser Verschlechterung der Einfügedämpfung, d. h. der Differenz zwischen den Ergebnissen aus V1 und V3. Der Einfluss der Form des Aufsatzes auf die Schallbeugung kompensiert also gewissermaßen die durch das Aufsatzmaterial verbesserte Einfügedämpfung.

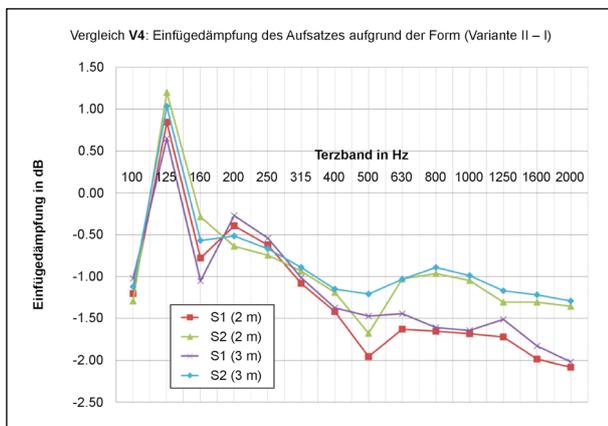


Bild 32: Ergebnisse des Vergleichs V4 (Variante II – I)

Terzband in Hz	Entfernung 2 m		Entfernung 3 m	
	S1	S2	S1	S2
100	-1,20	-1,29	-1,02	-1,12
125	0,84	1,20	0,65	1,03
160	-0,78	-0,29	-1,05	-0,57
200	-0,40	-0,64	-0,27	-0,52
250	-0,62	-0,74	-0,54	-0,67
315	-1,08	-0,93	-1,01	-0,89
400	-1,42	-1,19	-1,37	-1,15
500	-1,95	-1,68	-1,47	-1,21
630	-1,63	-1,03	-1,44	-1,03
800	-1,65	-0,97	-1,61	-0,89
1.000	-1,68	-1,05	-1,64	-0,99
1.250	-1,72	-1,31	-1,51	-1,17
1.600	-1,99	-1,30	-1,83	-1,22
2.000	-2,09	-1,36	-2,02	-1,29
Mittel	-1,30	-0,94	-1,20	-0,87

Tab. 18: Vergleich V4 – Einfügedämpfung des Aufsatzes aufgrund der Form ohne Impedanz (Variante II – I), Werte in dB

## 6 Diskussion der Ergebnisse

### 6.1 Zusammenfassung der Messungen

Die Ergebnisse der Nah- und Fernfeldmessungen von AED sowie die in der HAMt durchgeführten Messungen sind in Bild 33 zusammenfassend dargestellt. Außerdem sind auch die existierenden Messungen durch die Fa. AIT (Kapitel 2.3), inkludiert.

Weitere Messergebnisse wurden in der Vorher/Nachher-Messkampagne an der Talbrücke in Uttrichshausen durch die Fa. AED gewonnen (Kapitel 4.3). Hier zeigte sich nach allen Korrekturen eine akustische Wirksamkeit zwischen 0,4 dB und 1,7 dB. Berücksichtigt man, dass die Erhöhung der Lärmschutzwand um 0,5 m eine ähnliche akustische Wirksamkeit hätte, ist der Einfluss der Lärmschutzwandaufsätze auf die Schallausbreitung gemäß dieser in-situ-Untersuchung vernachlässigbar.

Aus dieser Vielzahl an Messungen lassen sich zwei wesentliche Kernergebnisse extrahieren:

Unter normgerechten Bedingungen ergeben sich für den Lärmschutzwandaufsatz Schallbeugungsindex-Differenzen bis ca. 1 dB. Im Fernfeld schwanken die Ergebnisse am deutlichsten mit der Frequenz, es zeigt sich jedoch im Mittel die größte akustische Wirksamkeit bei normgerechter Betrachtung. Diese Aussage deckt sich im Wesentlichen mit der Einschätzung der Fa. NUA-Umwelttechnik

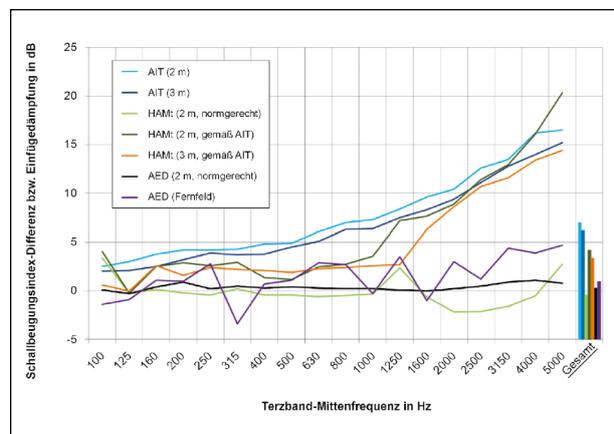


Bild 33: Messergebnisse der Schallbeugungsindex-Differenz bzw. Einfügedämpfung des Lärmschutzwandaufsatzes; gemessen durch die Fa. AIT (in 2 m und 3 m), in der HAMt (normgerecht und gemäß AIT in 2 m und 3 m) sowie durch die Fa. AED (normgerecht und im Fernfeld).

GmbH, die eine Wirksamkeit von ca. 1 dB bis 2 dB in größere Entfernung zum Aufsatz abgeschätzt hat. In der messtechnisch aufwendigen in-situ-Untersuchung wird die geringe akustische Wirksamkeit der Aufsätze außerdem in einer sehr detaillierten Auswertung bestätigt.

Auch die nicht-normgerechten Messungen liefern untereinander vergleichbare Ergebnisse. Da hier – trotz Erhöhung der Beugungskante um 50 cm – die Höhen der Schallquellen und Mikrofone nicht angepasst werden, vergleicht man in den Messungen ohne und mit Aufsatz verschiedene Schallschattenbereiche hinter der Wand miteinander. So kommt es, dass die Schallbeugungsindex-Differenzen mit steigender Frequenz zunehmen, was die Frequenzabhängigkeit des Beugungseffektes abbildet. Nur ein geringer Anteil dieser akustischen Wirksamkeit lässt sich der besonderen Form und dem Material des Aufsatzes zuschreiben.

## 6.2 Zusammenfassung der Simulationen

Die Verwendung von SYSNOISE für die BEM-Simulationen war mit einigen Schwierigkeiten und Einschränkungen verbunden, die dazu führten, dass nicht alle Modell-Varianten und Frequenzen mit SYSNOISE berechnet werden konnten. Zum einen musste das Berechnungsvolumen stark reduziert werden, um überhaupt verwertbare Ergebnisse nach einer annehmbaren Rechenzeit zu erhalten, zum anderen limitierten die hohen Rechenzeiten auch die Feinheit der Diskretisierung bzw. die Mesh-Element-Größe. (Mit steigender Frequenz, d. h. kleinerer Wellenlänge, reduziert sich die minimal benötigte Mesh-Element-Größe; siehe Kapitel 5.1.) So gelang es mit SYSNOISE lediglich die Terzbänder bei 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz und 1.000 Hz für eine Quellposition zu betrachten.

Für den normgerechten Vergleich der Wand mit und ohne Aufsatz (Tabelle 14, Spalte 2 und 5) ergeben sich Einfügedämpfungen unter 1 dB. In drei Fällen erhält man sogar negative Dämpfungswerte. Die Terz bei 630 Hz bildet mit einem Wert von 2,5 dB eine Ausnahme. In den Resultaten ist zwar keine klare Systematik erkennbar, dennoch lässt sich zumindest folgern, dass die SYSNOISE-Simulationen keine signifikante akustische Wirksamkeit des Aufsatzes belegen können. Schaut man sich den nicht-normgerechten Vergleich analog zur AIT-Studie an (Tabelle 12, Spalte 2 und 5), zeigen sich er-

wartungsgemäß höhere Einfügedämpfungen zwischen 2,8 dB und 14,3 dB. Auch wenn die simulierten Werte in einer ähnlichen Größenordnung wie in der AIT-Studie liegen, zeigt sich auch hier keine Systematik mit variierender Frequenz. Die Absolutwerte der Einfügedämpfungen sind schwer interpretierbar (beispielsweise bei 1.000 Hz 14,3 dB in 2 m Entfernung und nur noch 3,4 dB in 3 m). Nichtsdestotrotz demonstrieren die Simulationsergebnisse, dass die Installation der Lärmschutzwandaufsätze eine signifikante akustische Wirksamkeit mit sich bringt – allerdings ohne ein konkretes Maß für die Dämpfung zu liefern oder zu klären, zu welchem Teil der Effekt durch die Erhöhung allein herbeigeführt wird und inwieweit die Materialeigenschaften verantwortlich sind.

Die FEM-Simulationen mit ANSYS räumen einen großen Teil der bei SYSNOISE auftretenden Schwierigkeiten aus dem Weg und erlauben eine weitaus systematischere Herangehensweise an die offenen Fragestellungen. Zwar zeigt sich auch bei der Modellierung mit ANSYS, dass die Anzahl der zu berechnenden Gitterelemente für hohe Frequenzen im Berechnungsvolumen so groß wird, dass auch hier der leistungsstarke Computer an seine Grenzen stößt. Bis zum Terzband bei 2.000 Hz können jedoch alle Modell-Varianten für alle Quellpositionen erfolgreich simuliert werden.

Aus den Einfügedämpfungen, die sich aus den unterschiedlichen Variantenvergleichen ergeben, lassen sich vier wesentliche Erkenntnisse über die Aufsätze gewinnen:

1. Der normgerechte Vergleich der Wand mit und ohne Aufsätze macht deutlich, dass die akustische Wirksamkeit der Aufsätze mit Einfügedämpfungen unter 1 dB für beinahe alle Terzbänder nicht signifikant ist. Dies bestätigt die Vermutung aus den SYSNOISE-Rechnungen.
2. Ein Maß für die akustische Wirksamkeit der Aufsätze inkl. des Effektes, den die Erhöhung bewirkt, liefert die nicht-normgerechte vergleichende Betrachtung. Im Mittel kann man hier von einer Minderung zwischen 6 dB und 7 dB ausgehen. SYSNOISE lieferte hier zuvor nur eine ungefähre Größenordnung und stark schwankende Werte. Die mit ANSYS berechneten Einfügedämpfungen sind in sich konsistent und weisen eine klare Frequenzabhängigkeit auf.
3. Die FEM-Modellrechnung unter der Annahme eines schallharten Aufsatzes kann eine signifi-

kante Wirkung der Material-Impedanz belegen. Konkret zeigen die Rechnungen, dass der Beitrag des Aufsatzmaterials zwischen 1 dB und 2 dB liegt.

4. Ein überraschendes Ergebnis, und zugleich eine Erklärung für den Verlust des positiven Effekts des Aufsatzmaterials, liefert der Vergleich der Simulation der Wand ohne Aufsatz mit der Variante mit schallhartem Aufsatz. Hier tritt nämlich eine Pegelerhöhung zwischen 1 dB und 2 dB auf, die in der Form des Aufsatzes begründet sein muss und sehr konsistent die Verschlechterung der durch das Aufsatzmaterial theoretisch verbesserten Einfügedämpfung erklärt.

Wie in Kapitel 5.2 beschrieben beträgt der Fehler für die in ANSYS berechneten Einfügedämpfungen pro Terzband maximal 1 dB. Dies folgt aus der Mittelung über ausreichend viele Einzelfrequenzen innerhalb des jeweiligen Frequenzbandes gemäß (JUNKER et al., 2015). Nichtsdestotrotz können auch fehlerhafte Annahmen in der Modellierung selbst zu Ungenauigkeiten führen:

- Modellierung der Aufsätze

Die Impedanz wird in ANSYS über die Randbedingung „Impedance Boundary“ realisiert. Hierbei werden die Aufsatzoberflächen mit der in Kapitel 3.3 bestimmten Impedanz (Kehrwert der in Bild 10 dargestellten Admittanz) belegt. Bei diesem Vorgehen handelt es sich um eine Näherung. Die durchgeführte Untersuchung im KUNDT'schen Rohr liefert Werte für den spezifischen Probenkörper und nicht die „echte“ Material-spezifische Impedanz. Daher kann nicht das vollständige Aufsatzvolumen als poröses Medium mit den korrekten Ausbreitungseigenschaften modelliert werden. Auch ist eine Berechnung der Material-spezifischen Impedanz über verschiedene Ansätze aus der Literatur (nach DELANY-BAZLEY (DELANY et al., 1970), MIKI (MIKI, 1990) oder JOHNSON-CHAMPOUX-ALLARD (JOHNSON et al., 1987; CHAMPOUX et al., 1991) nicht möglich, da die hierfür notwendigen Eingangsgrößen (z. B. der Ausbreitungskoeffizient) fehlen. Im Rahmen der erreichbaren Genauigkeit stellt der Ansatz über die Randbedingung „Impedance Boundary“ aber eine gute Näherung dar, zumal auch nur relative Betrachtungen angestellt werden und keine absoluten Zahlen verglichen werden.

- Begrenztheit des modellierten Raumes

In einem ersten Anlauf wurde die FEM-Modellierung vollständig 3-dimensional durchgeführt. D. h. die Länge der Lärmschutzwand und der Aufsätze (Ausdehnung in y-Richtung) sowie die Abstände vor, hinter und über der Wand entsprechen den Dimensionen während der Messungen in der HaMt (Kapitel 4.2). Es wurden zudem Punkt- statt Linienquellen für die Emission verwendet. Um auch in y-Richtung die notwendigen nicht-reflektierenden Randbedingungen zu erhalten, umschloss die PML das Berechnungsvolumen vollständig. Im Projektverlauf stellte sich dieses Vorgehen jedoch als nicht zielführend heraus, da die Größe des Berechnungsvolumens mit steigender Frequenz schnell zu nicht mehr praktikablen Rechenzeiten führte. Zudem hatte die Dimensionierung der Raumtiefe in y-Richtung einen signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse, d. h. die Resultate waren nicht unabhängig von der Länge der Wand. Dies liegt vermutlich daran, dass der harmonische Ansatz, welcher den FEM-Simulationen zugrunde liegt, eine unendlich ausgedehnte Wand voraussetzt. Das Rechengebiet kann jedoch – aufgrund der begrenzten Rechenleistung – nicht ausreichend groß gewählt werden, damit diese Approximation zutrifft. So tragen bei Begrenzung der Raumdimensionen Schallanteile aus Fernbereichen immer noch relevant bei und sind nicht vernachlässigbar. Aus diesen Gründen wird, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, unter Anwendung der Symmetriebedingung (in y-Richtung) auf den 2½-dimensionalen Ansatz mit Linienquelle ausgewichen. Für die Berechnungen der Schallleistungspegel an den zentralen Mikrofonpositionen und den relativen Vergleich der Modell-Varianten liefert diese Vereinfachung eine ausreichend gute Näherung.

### 6.3 Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der FEM-Simulationen in ANSYS sind in Bild 34 den Messergebnissen aus der HaMt sowie den Resultaten der Fa. AIT zusammenfassend gegenübergestellt. Die AED-Messungen (siehe Bild 33) sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht nochmal inkludiert. Es ist zu beachten, dass in den ANSYS-Rechnungen nur die senkrechte An-

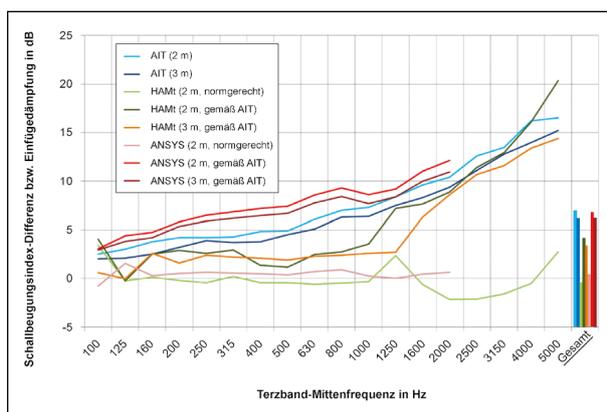


Bild 34: Vergleich der Messergebnisse der Schallbeugungsindex-Differenz bzw. Einfügedämpfung des Lärmschutzwandaufsatzes mit den Ergebnissen der FEM-Simulationen in ANSYS

ordnung betrachtet wurde, d. h. sich gegenüberliegende Mikrofon- und Quellpositionen. In diesem Falle ist dementsprechend nur über jeweils zwei Mikrofonpositionen gemittelt worden, da keine Simulation unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur Schirmkante (siehe Bild 15 und 16) vorliegt.

Bild 34 zeigt, dass sich die Messungen durch die numerischen Simulationen zwar nicht eins zu eins reproduzieren lassen. Jedoch erklären die ANSYS-Rechnungen sowohl die geringe akustische Wirksamkeit bei normgerechter Messung als auch die hohen Einfügedämpfungen aus der AIT-Untersuchung recht gut. Für letztere findet eine leichte Überschätzung der akustischen Wirksamkeit durch die ANSYS-Rechnungen statt. Im Gegensatz dazu liefern die Messungen in der HaMt vergleichsweise geringe Einfügedämpfungen in der Messanordnung gemäß AIT, insbesondere im mittleren Frequenzbereich. Die Ursache dieser Abweichung liegt im Wesentlichen in den unterschiedlichen Messverfahren begründet: Während in der HaMt ein dauerhaftes weißes Rauschen als Emission genutzt wird und ein einfacher Immissionspegel mit und ohne Wandaufsatz gemessen wird, nutzt das ADRIENNE-Verfahren in der AIT-Untersuchung ein impulsartiges Signal (üblicherweise ein MLS-Signal) als Prüfsignal und die Impulsantwort wird über ein Zeitfenster von wenigen Millisekunden ausgewertet. Somit ist ein direkter quantitativer Vergleich der resultierenden Einfügedämpfungen bzw. Schallbeugungsindex-Differenzen nur eingeschränkt möglich.

## 7 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Studie wurde ein absorbierendes Aufsatzsystem aus grobporigem Schaumstoff für Lärmschutzwände intensiv untersucht und es konnten umfassende und signifikante Erkenntnisse über die akustische Wirksamkeit der Lärmspoiler gewonnen werden.

Aus früheren Untersuchungen kann zusammenfassend entnommen werden, dass unter normgerechten Bedingungen die Schallbeugungsindex-Differenzen für die ältere Variante des Lärmspoilers ca. 2 dB und für das neuere Modell ca. 2 bis 3 dB betragen. Das entspricht einer mittleren akustischen Wirksamkeit im Nahbereich des Aufsatzes, die vor allem durch das Absorptionsvermögen des Materials hervorgerufen wird. Dies deckt sich weitestgehend mit der Einschätzung der Fa. NUA-Umwelttechnik GmbH, die eine Wirksamkeit von ca. 1 bis 2 dB in größerer Entfernung zum Aufsatz abgeschätzt hat. Eine akustische Wirksamkeit scheint daher grundsätzlich gegeben zu sein.

Die Untersuchung der Materialproben nach UV-Bestrahlung bzw. nach der Kombination von Frost-Tau-Wechsel und Hitze bei  $85^\circ\text{C}$  ergaben, dass unter Frost-, Hitze- und UV-Einfluss die akustischen Eigenschaften größtenteils erhalten bleiben. Es ist keine starke Abschwächung des Absorptionsgrades zu beobachten. Das Maximum der Absorption verschiebt sich um  $\approx 100$  Hz von  $\approx 1.140$  Hz nach  $\approx 1.240$  Hz und die Standardabweichung nimmt geringfügig zu. Die abschließenden Untersuchungen zeigen eine leichte Verbesserung des Absorptionsgrades von bis zu 10 % bei 1.250 Hz. Dabei fällt diese Verbesserung bei den Proben, welche zusätzlich Hitze und Frost ausgesetzt wurden, mit 5,1 % etwas geringer aus.

In verschiedenen Messungen – unter Laborbedingungen in der Halle für akustische Modelltechnik, im Freifeld mit einer künstlichen Schallquelle und in situ an einer Autobahn-Talbrücke – konnte nachgewiesen werden, dass die betrachteten Lärmschutzwandaufsätze im Vergleich zu einer simplen Erhöhung der Wand keinen signifikanten akustischen Mehrwert besitzen. Alle Messungen liefern bei normgerechten Vorgehen eine akustische Wirksamkeit von unter 1 dB. Ohne Anpassung der Referenzhöhe in den Messungen mit Aufsatz erhält man mittlere Einfügedämpfungen von ca. 3 dB – 4 dB. Verglichen mit der Wand ohne Aufsatz führt die In-

Installation der Lärmschirme folglich zu Pegelminderungen in dieser Größenordnung. In der Tendenz reproduzieren die Messungen in der HaMt die Resultate der existierenden Untersuchung der Fa. AIT, jedoch wurden dort etwas höhere akustische Wirksamkeiten (im Bereich zwischen 5 dB und 7 dB im Mittel) gemessen.

Die durchgeführten BEM- und FEM-Simulationen mit SYSNOISE und ANSYS bestätigten im Wesentlichen die Ergebnisse der Messungen. Auch hier ließ sich darstellen, dass die Aufsätze verglichen mit der niedrigeren Wand eine signifikante akustische Wirksamkeit haben, diese aber in derselben Größenordnung wie bei einer äquivalenten Wanderrhöhung liegt. In weiterführenden Vergleichen konnten mittels der FEM-Simulationen die verschiedenen Einflüsse auf die Schallausbreitung separiert werden: Während das Absorptionsmaterial selbst einen positiven Effekt auf die akustische Wirksamkeit hat, beeinflusst die Form des Aufsatzes die Beugung und damit die erreichbaren Einfügedämpfungen, sodass der resultierende Effekt in Summe der Wirkung einer entsprechenden Erhöhung der Wand entspricht. Das in ANSYS verwendete 2½-dimensionale Modell kann hier natürlich nur eine Näherung liefern (wie in Kapitel 6.2 diskutiert); nichtsdestotrotz weisen die FEM-Rechnungen in sich eine überzeugende Konsistenz auf und liefern so eine plausible Erklärung für die – gewissermaßen überraschend – geringen Einfügedämpfungen gefunden werden.

Aus akustischer Sicht haben Lärmschutzwandauflätze dieser Art folglich keinen Vorteil gegenüber einer Wanderrhöhung. Will man das Lärmschutzniveau bei einer vorhandenen Lärmschutzwand erhöhen, beeinflussen allerdings auch andere Kriterien (wie z. B. Kosten oder Umgebungssituation) die Entscheidung. Hier kann die einfache Installation ggf. ein Argument für die Verwendung der Aufsätze sein. Darüber hinaus kann der optische Eindruck einen hohen technischen Standard vermitteln und sich eventuell positiv auf das Lärmempfinden auswirken. Derartige Effekte wären jedoch in einer weiteren Studie gezielt zu untersuchen und können nicht pauschal angenommen werden.

Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, dass die Modifizierung der Beugungskante auf Lärmschutzwänden Potenzial für einen zusätzlichen Minderungseffekt birgt. Die methodenübergreifende Analyse der Ergebnisse erlaubt es, das Pegelminderungspotenzial zu quantifizieren und Aussagen

über die Vorhersagbarkeit der akustischen Wirksamkeit von Lärmschutzwandauflätzen mit Hilfe von FEM-Simulationen zu treffen. Dieses Wissen um die Qualität und Aussagekraft numerischer Simulationen kann zukünftig im Vorfeld für eine systematische Optimierung und Abschätzungen genutzt werden, um die messtechnische Untersuchung eines Aufsatzes zu motivieren bzw. die praktische Umsetzung zu unterstützen.

## Literatur

- AED (2019): Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen – Schlussbericht FE02. 0417/2017/IRB. Dresden : Gesellschaft für Akustikforschung GmbH, 2019
- AIDICO (2013): Sound absorption behavior and tensile modulus behavior of sound absorber SEALED AIR material STRATOCELL WHISPER UV (63697) under accelerated ageing tests in QUV-Chamber. Valencia : Instituto Tecnológico de la Construcción, 2013
- CHAMPOUX, Y. und ALLARD, J.-F. (1991): Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *J. Appl. Phys.* 1991, 70, pp. 1975-1979
- CONTER, M. et al. (2015): Untersuchungen der Schallbeugungseffekte des CALMA-TEC PIN Lärmspoilers®. Wien : Austrian Institute of Technology GmbH, 2015
- DB Netze (2012): Innovative Maßnahmen zum Lärm- und Erschütterungsschutz am Fahrweg – Schlussbericht. Frankfurt a. M. : s. n., 2012
- DELANY, M. E. und BAZLEY, E. N. (1970): Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Teddington, London : National Physics Laboratory, 1970
- DIN EN 1793-3 (1997): Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum. Berlin : Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI, 1997
- DIN EN 1793-4 (2015): Lärmschutzvorrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften – Teil 4: Produktspezifische Merkmale: In-situ-Werte der Schallbeugung. Berlin : Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI, 2015
- DIN ISO 9613-2 (1999): Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren (ISO 9613-2:1996). Berlin : Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI, 1999
- Fachverband für Strahlenschutz e. V. (2012): Leitfaden „Sonnenstrahlung“. Köln : Arbeitskreis „Nichtionisierende Strahlung“, 2012
- GEUZAIN, C. und REMACLE, J.-F.: Gmsh – Programmbeschreibung und Download. [Online] [Zitat vom: 21. 08 2019.] <http://gmsh.info>
- HOWARD, C. Q. und CAZZOLATO, B. S. (2015): Acoustic Analyses using MATLAB and ANSYS. Boca Raton : CRC Press, 2015
- JOHNSON, D. L.; KOPLIK, J. und DASHEN, R. (1987): Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mech.* 1987, 176, pp. 379-402
- JUNKER, F. et al. (2015): Classification de l'influence relative des paramètres physiques affectant les conditions de propagation à grande distance. Clamart : Technischer Bericht, 2015
- LMS International (2003): SYSNOISE Rev. 5.6. Release Notes & Getting Started Manual. 2003
- MIKI, Y. (1990): Acoustical properties of porous materials – Modification of Delany-Bazley models. Tatemachi : Faculty of Engineering, Takushoku University, 1990
- NUA-Umweltanalytik (2008): Schallminderungswirkung von Lärmschutzwand-Aufsatzelementen „Kammspoiler“ der Fa. CALMA-TEC. Maria Enzersdorf : Schalltechnischer Untersuchungsbericht L-2593-1/2-08, 2008
- OSRAM: Ultra-Vitalux Hochdruck-Ultraviolettstrahler mit Sockel E27 300W. Produktdatenblatt
- SealedAir: Materialbeschreibung Stratocell® Whisper®. [Online] [Zitat vom: 21. 08 2019.] <https://sealedair.com/product-care/product-care-products/stratocell-whisper>
- VDI 2720 (1997): Schallschutz durch Abschirmung im Freien. Düsseldorf : Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI, 1997

## Bilder

- Bild 1: Untersuchtes Lärmschutzwand-Aufsatzsystem
- Bild 2: Für die Untersuchung der Temperaturbeständigkeit verwendete Klimakammer
- Bild 3: Zeitlicher Temperaturverlauf des Testzyklus für Frost-Tau-Wechsel
- Bild 4: UV-Bestrahlungsgerät der BAST
- Bild 5: KUNDT'sches Rohr für einem Proben-durchmesser von 100 mm
- Bild 6: Proben für das KUNDT'sche Rohr mit einem Durchmesser von 100 mm, links mit offener und rechts mit geschlossener Oberfläche
- Bild 7: Stanzwerkzeug zur Herstellung von Proben für das KUNDT'sche Rohr
- Bild 8: Absorptionsgrad  $\alpha$  (dicke Linie) mit Standardabweichung  $\sigma$  (schraffierter Bereich) für korrekt (rot) und fehlerhaft (blau) eingesetzte Proben
- Bild 9: Absorptionsgrad  $\alpha$  und Standardabweichung  $\sigma$  der Proben
- Bild 10: Admittanz der Proben als Eingangsgröße für die Simulationen
- Bild 11: Frequenzverlauf der Absorptionskoeffizienten aus den Materialtests
- Bild 12: Messort mit drei parallelen Wänden zur Untersuchung durch AED
- Bild 13: Messanordnung für die Nahfeldmessung durch AED
- Bild 14: Messanordnung für die Fernfeldmessung durch AED
- Bild 15: Geometrie der Lautsprecherpositionen (S) und Mikrofonanordnungen (M) der Nahfeldmessung ohne Aufsatz nach DIN EN 1793-4 (Quelle: DIN EN 1793-4, 2015)
- Bild 16: Geometrie der Lautsprecherpositionen (S) und Mikrofonanordnungen (M) der Nahfeldmessung mit Aufsatz nach DIN EN 1793-4 (Quelle: DIN EN 1793-4, 2015)
- Bild 17: Geometrie der Lautsprecherpositionen und des horizontal ausgerichteten Linienarrays bei der Fernfeldmessung ohne bzw. mit Aufsatz
- Bild 18: Geometrie zur Bestimmung der Differenz des Abschirmmaßes  $\Delta D_z$
- Bild 19: Modellwand mit Aufsätzen in der HAMt – Vorderansicht mit Mikrofonen
- Bild 20: Modellwand mit Aufsätzen in der HAMt – Rückansicht mit Lautsprecher
- Bild 21: 3D-Darstellung der Modellvariante I bzw. III (siehe Bild 22) der Lärmschutzwand mit Aufsatz für die Berechnungen in SYSNOISE
- Bild 22: Varianten der iBEM-Modelle für die Berechnungen in SYSNOISE
- Bild 23: Örtlich gemittelter Schalldruckpegel im Bereich hinter der Lärmschutzwand für die Variante I: Position der Schallquelle gemäß Adrienne-Verfahren ist S2
- Bild 24: Frequenzgemittelter Schalldruckpegel im Bereich hinter der Lärmschutzwand für die Variante I: Position der Schallquelle nach dem Adrienne-Verfahren ist S2
- Bild 25: Prinzipielles geometrisches Modell für die FEM-Simulationen in ANSYS; hier gezeigt wie für den Frequenzbereich 1.168 Hz – 2.178 Hz verwendet
- Bild 26: Darstellung und Beschreibung der in ANSYS berechneten Modell-Varianten
- Bild 27: FEM-Berechnung des Schalldruckpegels bei 1.360 Hz für Variante I (Lärmschutzwand ohne Aufsatz)
- Bild 28: FEM-Berechnung des Schalldruckpegels bei 1.360 Hz für Variante III (Lärmschutzwand mit Impedanz-belegtem Aufsatz)
- Bild 29: Ergebnisse des Vergleichs V1 (Variante III – I)
- Bild 30: Ergebnisse des Vergleichs V2 (Variante IV – I)
- Bild 31: Ergebnisse des Vergleichs V3 (Variante III – II)
- Bild 32: Ergebnisse des Vergleichs V4 (Variante II – I)
- Bild 33: Messergebnisse der Schallbeugungsindex-Differenz bzw. Einfügedämpfung

des Lärmschutzwandaufsatzes; gemessen durch die Fa. AIT (in 2 m und 3 m), in der HAMt (normgerecht und gemäß AIT in 2 m und 3 m) sowie durch die Fa. AED (normgerecht und im Fernfeld).

Bild 34: Vergleich der Messergebnisse der Schallbeugungsindex-Differenz bzw. Einfügedämpfung des Lärmschutzwandaufsatzes mit den Ergebnissen der FEM-Simulationen in ANSYS

## Tabellen

- Tab. 1: Messergebnisse der Fa. NUA – Gemessene Schallpegelminderung in dB im Vergleich mit berechneter Minderung nach ISO 9613-2
- Tab. 2: Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DI_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DI}$  für das alte Aufsatzmodell in dB – Ergebnisse der AIT-Messung bzw. Rechnung nach ISO 9613-2
- Tab. 3: Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DI_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DI}$  für das neue Aufsatzmodell in dB – Ergebnisse der AIT-Messung bzw. Rechnung nach ISO 9613-2
- Tab. 4: Komponenten des Messsystems Brüel & Kjær Typ 4206 (KUND'sches Rohr)
- Tab. 5: Absorptionskoeffizient für verschiedene Materialbelastungsarten und -zeiten für den Frequenzbereich von 63 Hz bis 1.600 Hz
- Tab. 6: Ergebnis der Nahfeldmessung, Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DI_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DI}$  in dB für den Lärmschutzwandaufsatz
- Tab. 7: Ergebnis der Fernfeldmessung, Einfügedämpfung  $D_E$  für den Lärmschutzwandaufsatz in dB mit und ohne Korrektur der Wanderhöhung
- Tab. 8: Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DE_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DE}$  für den Lärmschutzwandaufsatz in dB, Messanordnung des AIT (2 m)
- Tab. 9: Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DE_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DE}$  für den Lärmschutzwandaufsatz in dB, Messanordnung des AIT (3 m)
- Tab. 10: Schallbeugungsindex-Differenzen der Terzen  $\Delta DE_j$  und der Summe  $DL_{\Delta DE}$  für den Lärmschutzwandaufsatz in dB, normgerecht (2 m)
- Tab. 11: Immissionsschalldruckpegel und Standardabweichung an den MP vor und nach Installation der Lärmschutzwandaufsätze sowie akustische Wirksamkeit (Verbesserung); mit (links) bzw. ohne (rechts) Leistungs-, Wetter- und Störgeräuschkorrektur (Quelle: AED, 2019)
- Tab. 12: Schallbeugungsindex-Differenzen bzw. Einfügedämpfungen für den Lärmschutzwandaufsatz in dB – Vergleich der AIT-Messungen und SYSNOISE-Simulationen
- Tab. 13: Schallbeugungsindex-Differenzen bzw. Einfügedämpfungen für den Lärmschutzwandaufsatz in dB – Vergleich der ISO- und SYSNOISE-Berechnungen an den AIT-Messpositionen
- Tab. 14: Schallbeugungsindex-Differenzen bzw. Einfügedämpfungen für den Lärmschutzwandaufsatz in dB – normgerechter Vergleich der ISO-Berechnungen und SYSNOISE-Simulationen
- Tab. 15: Vergleich V1 – normgerechte Einfügedämpfung des Aufsatzes
- Tab. 16: Vergleich V2 – nicht-normgerechte Einfügedämpfung des Aufsatzes analog zur AIT-Studie
- Tab. 17: Vergleich V3 – Anteil der Einfügedämpfung, der durch die Material-Impedanz entsteht
- Tab. 18: Vergleich V4 – Einfügedämpfung des Aufsatzes aufgrund der Form ohne Impedanz

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

#### 2018

- V 300: **Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoff-rückhalt und Standfestigkeit von Banketten**  
Werkenthin, Kluge, Wessolek  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 301: **Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung**  
Kemper, Sümmermann, Baier, Klemps-Kohnen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 302: **Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB**  
Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 303: **Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer**  
Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter, Jeschke, Skottke € 19,50
- V 304: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015**  
Fitschen, Nordmann € 31,00  
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden. € 15,00
- V 305: **Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen**  
Hartmann, Londong € 16,00
- V 306: **Anpassung des bestehenden Straßennetzes an das Entwurfskonzept der standardisierten Straßen – Pilotprojekt zur Anwendung des M EKLBest**  
Lippold, Wittig  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 307: **Evaluation des Sicherheitsaudits von Straßen in der Planung**  
Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Bark, Beaulieu, Theis € 17,50
- V 308: **Überarbeitung und Aktualisierung des Merkblattes für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 1999)**  
Gerstenberger, Hösch, Listl, Schwietering  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 309: **Photokatalytische Oberflächen zur Minderung von Stickoxidbelastungen an Straßen – TiO<sub>2</sub>-Pilotstudie Lärmschutzwand**  
Baum, Lipke, Löffler, Metzger, Sauer € 16,50
- V 310: **Umweltfreundlicher Straßenbelag – photokatalytischer Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie**  
Wang, Oeser, Steinauer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 311: **Feldversuch mit Lang-Lkw**  
Irzik, Kranz, Bühne, Glaeser, Limbeck, Gail, Bartolomaeus, Wolf, Sistenich, Kaundinya, Jungfeld, Ellmers, Kübler, Holte, Kaschner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

#### V 312: **Sicherheitswirkung, Dauerhaftigkeit und Lärmemission von eingefrästen Rüttelstreifen**

Hegewald, Vesper, Irzik, Krautscheid, Sander, Lorenzen, Löffler, Ripke, Bommert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

#### 2019

- V 313: **Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen**  
Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50
- V 314: **Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten**  
Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50
- V 315: **Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung**  
Kappich, Westermann, Holst € 15,50
- V 316: **Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände**  
Lindner, Hartmann, Schulze, Hübelt € 18,50
- V 317: **Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen**  
Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Walther € 22,00
- V 318: **Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen**  
Wolf, Berger, Bärwolff € 15,50
- V 319: **Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen**  
Lippold, Vettters, Ressel, Alber  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 320: **Einsatzbereiche und Entwurfselemente von Rad-schnellverbindungen**  
Malik, Lange, Andriessse, Gwiasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00
- V 322: **Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren**  
Hausmann € 18,00
- V 323: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2016**  
Fitschen, Nordmann € 31,50  
Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden. € 15,00
- #### 2020
- V 321: **Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement**  
Diegmann, Wurstthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner € 20,00
- V 324: **Konzept zur Bewertung des Verkehrsablaufs an Knotenpunkten mit und ohne LSA**  
Vortisch, Buck, Leyn, Baier, Schuckkieß, Schimpf, Schmotz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 325: **Entwurfsparameter von Hochleistungsstraßen innerhalb bebauter Gebiete**  
D. Schmitt, J. Gerlach, M. Schwedler, F. Huber, H. Sander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 326: **Straßenverkehrszählung 2015 – Methodik der manuellen Zählungen**  
Schmidt, Frenken, Mahmoudi € 15,50
- V 327: **Straßenverkehrszählung 2015 – Ergebnisse**  
Frenken, Mahmoudi € 16,50

- V 328: **Anprallprüfungen an Fahrzeug-Rückhaltesystemen und Entwicklung von Nachrüstlösungen**  
Meisel, Balzer-Hebborn, Eilmers, Jungfeld, Klostermeier, Kübler, Schmitz, Schwedhelm, Yu  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 329: **Streckenbezogene Glättevorhersage**  
Schedler, Gutbrod, Müller, Schröder € 24,50
- V 330: **Führung des Radverkehrs an Landstraßen**  
Baier, Leu, Rittershaus  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 331: **Leitfaden für die Streckenfreigabe für den Einsatz von Lang-Lkw**  
Lippold, Schemmel, Förg, Süßmann € 17,00
- V 332: **Räumliche Linienführung von Autobahnen**  
Lippold, Zösch  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 333: **Passive Schallschutzmaßnahmen – Akustische Wirksamkeit**  
Hänisch, Heidebrunn € 17,00
- V 334: **Akustische Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**  
Lindner, Kluth, Ruhnau, Schulze € 17,00
- V 335: **Ermittlung aktualisierter Grundlagen für Beschleunigungsvergütungen in Bauverträgen**  
Geistefeldt, Hohmann, von der Heiden, Finkbeiner € 16,00
- V 336: **Vergleich der Detektoren für die Verkehrserfassung an signalisierten Knotenpunkten**  
Ungureanu, Ilić, Radon, Rothe, Reichert, Schober, Stamatakis, Heinrich € 18,50
- V 337: **Bridge-WIM Pilotversuch – Begleitung und Auswertung**  
Kathmann, Scotti, Kucera € 18,50
- V 345: **Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen mit Geräuschemissionsdaten der Straße und meteorologischen Daten**  
Liepert, Skowronek, Eberlei, Crijenkovic, Müller, Schady, Elsen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 346: **Zusammenhang reduzierter Geräuschgrenzwerte mit den in-use Geräuschemissionen bei unterschiedlichen Verkehrssituationen**  
Müller, Huth, Liepert € 15,00
- V 347: **Chancen in der Verkehrsbeeinflussung durch Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation**  
Schwietering, Löbbeling, Spangler, Gabloner, Busch, Roszak, Dobmeier, Neumann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 348: **Einsatz und Verkehrssicherheit von Fußgängerüberwegen**  
Bohle, Busek, Schröder € 18,50
- V 349: **Straßenbepflanzung und Verkehrssicherheit – Ermittlung unfallbeeinflussender Merkmale auf Basis empirischer Modelle unter besonderer Berücksichtigung der Bepflanzung im Seitenraum an Landstraßen**  
Schreck-von Below € 22,00
- V 350: **Wirksamkeit von Lärmschutzwandaufsätzen**  
Bartolomaeus, Strigari, Sammet  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.

## 2021

- V 338: **Streckenbeeinflussungsanlagen – Entwurf eines regelungstechnischen Modells zur verbesserten Harmonisierung des Verkehrsablaufs**  
Schwietering, Schwietering, Maier, Hakenberg, Pyta, Abel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 339: **Aktualisierung der Datenbank MARLIS**  
Schneider, Turhan, Pelzer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 340: **Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2017**  
Fitschen, Nordmann € 31,00
- V 341: **Lebenszykluskostenbewertung von Schutzeinrichtungen**  
Eckert, Hendrich, Horlacher, Kathmann, Scotti, von Heel  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter [https:// bast.opus.hbz-nrw.de/](https://bast.opus.hbz-nrw.de/) heruntergeladen werden.
- V 342: **Entwicklung eines aktuellen, echtzeit-verfügbaren Key Performance Indicator (KPI) Systems für das deutsche Autobahnnetz**  
Peter, Janko, Schick, Waßmuth, Friedrich, Bawidamann € 21,00
- V 343: **Kreisverkehre an Landstraßen Auswirkungen der Erkennbarkeit und der Zufahrtsgestaltung auf die Verkehrssicherheit**  
Schmotz, Schröter, Schemmel, Lippold, Schulze € 21,50
- V 344: **Verkehrsträgerübergreifende Lärmkumulation in komplexen Situationen**  
Popp, Eggers, Heidebrunn, Cortes € 21,00
- Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48
- Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.
- [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)
- Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.